Ces algorithmes qui nous gouvernent

La Recherche

La Recherche

www.larecherche.fr

Fabiola Gianotti
LES PROJETS FOUS DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES

Terre
LE CHAMP MAGNÉTIQUE VA S'INVERSER

Les conséquences sur la vie, les technologies, l'environnement

MAI 2016 DOM 7,40 € - BEL 7,40 € - LUX 7,40 € - ALL 8,20 € - ESP 7,40 € - GR 7,40 € - ITA 7,40 € - PORT.CONT 7,40 € - CAN 10,5 $ CAN - CH 12,40 FS - MAR 63 DH - TUN 6,50TND - MAYOTTE 8,80 € - TOM SURFACE 970 XPF - TOM AVION 1620 XPF - ISSN 00295671

N° 511 - MAI 2016

M 01108 - 511 - F: 6,40 € - RD

La Recherche
TERRE LE CHAMP MAGNÉTIQUE VA S'INVERSER

SOUTENEZ LE COLLÈGE DE FRANCE
ET PARTICIPEZ À L'AVENTURE DE LA RECHERCHE FRANÇAISE.

Le Collège de France rassemble le meilleur de la recherche française. Prix Nobel, médailles Fields, prix Abel et les plus grands chercheurs s'y côtoient pour faire avancer tous les domaines de la connaissance mondiale : mathématiques, sciences de la matière et du vivant, mais aussi histoire, sciences humaines, économie. Ce savoir, qui a vocation à rayonner partout dans le monde, est enseigné de manière libre et gratuite, au rythme des découvertes. Pour que la recherche avance, pour l'avenir de la France, rejoignez l'aventure en soutenant le Collège de France.

FONDATION
COLLÈGE
DE FRANCE

Découvrez nos programmes de recherche et toutes les informations pour réduire votre ISF sur www.fondation-cdf.fr

BETC – FONDATION DU COLLÈGE DE FRANCE – Siret : 505 153 270 00010

Égoïsme contagieux

Parmi les idées reçues qui circulent à propos des migrants, il en est une particulièrement nauséabonde : les réfugiés africains arrivent en Europe contaminés par le virus du sida, ma bonne dame, vous vous rendez compte ! En son temps, Jacques Chirac parlait d'odeur… Eh bien non. Les migrants n'arrivent pas avec leur VIH sous le bras. La situation est bien pire : c'est en France que bon nombre d'entre eux contractent le virus, comme l'explique Annabel Desgrées du Loû dans ce numéro (p. 69).

CETTE DÉMOGRAPHE de l'Institut de recherche pour le développement a réalisé une enquête minutieuse auprès d'un millier de migrants subsahariens. Suivant une approche chère à l'anthropologie, elle a combiné des entretiens sur leur parcours de vie à des analyses biologiques, notamment concernant le taux de virus présent dans le sang. Résultat : entre 35 et 49 % des migrants africains suivis pour une infection par le VIH en France ont contracté le virus sur notre sol. Un homme sur deux. Une femme sur trois. Et il semblerait que ce soit la même chose dans ce pays aussi civilisé que le nôtre qu'est la Grande-Bretagne.

L'EXPLICATION AVANCÉE EST GLAÇANTE : la grande précarité à laquelle sont confrontés les migrants est un facteur indirect de contamination. À leur arrivée en France, ils doivent en effet faire face, pêle-mêle, à une absence de logement stable pendant plusieurs années, des difficultés matérielles intenses qui font passer la santé au second plan, et pour les femmes, des relations sexuelles « consenties » en échange d'un toit. Cette étude qui vient d'être présentée à la 8e conférence internationale francophone VIH/Hépatites, à Bruxelles, s'ajoute aux images révoltantes de la jungle de Calais, la boue, les tentes de fortune. Sommes-nous devenus à ce point individualistes pour supporter une telle misère sans bouger ?

LA QUESTION DE L'INDIVIDUALISME est au cœur d'un autre grand débat actuel : celui de la vaccination. De plus en plus de personnes contestent l'aspect obligatoire de certains vaccins et refusent de s'y plier. Or une population n'est bien prémunie contre une épidémie que si un nombre suffisant de personnes est vacciné. Ce sujet et bien d'autres seront abordés lors du Forum Science, recherche et société organisé par *La Recherche* et *Le Monde*, le 25 mai. N'hésitez pas à nous y retrouver.

SOPHIA PUBLICATIONS : 8, rue d'Aboukir 75002 Paris. Tél. : 01 70 98 19 19 • **e-mail rédaction :** courrier@larecherche.fr • Pour joindre directement par téléphone un membre de la rédaction, composez le 01 70 98, suivi des quatre chiffres placés après son nom. Par mail, libellez l'adresse sur le modèle : initiale du prénom suivi du nom@sophiapublications.fr (sans accents).

Pour toute question concernant votre abonnement : 01 55 56 70 56 • **Adresse :** *La Recherche*, 4 rue de Mouchy 60438 Noailles Cedex. **Tél. :** 01 55 56 71 15. • **ABONNEMENTS : Tarif France :** 1 an 10 nos + 1 n° double 67 euros. 1 an 10 nos + 1 n° double + 4 hors-séries 89 euros. **Tarif international :** nous contacter. **E-mail :** abo.recherche@biwing.fr. • **Suisse :** Edigroup. Tél. : (0041) 22 860 84 01 • **Belgique :** Edigroup. Tél. : (0032) 70 233 304 • **Achat de revues et d'écrins *La Recherche*** – BP65 – 24, chemin latéral 45390 Puiseaux. **Tél. :** 02 38 33 42 89

La Recherche est publiée par Sophia Publications, filiale de Sophia Communications • **Président-directeur général et directeur de la publication :** Thierry Verret, assisté de Nelly Chirio (19 70) • **Directeur éditorial :** Maurice Szafran • **Directeur délégué :** Jean-Claude Rossignol • **Rédactrice en chef :** Sophie Coisne • **Rédactrice en chef technique :** Catherine Caltaux • **Conception graphique :** Dominique Pasquet • **Assistante :** Gabrielle Monrose (19 06) • **Chef des informations :** Philippe Pajot (19 29) • **Chefs de rubrique :** Hervé Cabibbo (19 30), Mathias Germain (19 33) • **Rédacteurs :** Gautier Cariou (19 31), Vincent Glavieux (19 32), Bérénice Robert (19 34), Sylvain Guilbaud (19 38) • **Service photo :** Claire Balladur (19 41) • **Secrétaire de rédaction :** Véronique Fuvel (19 36) • **Maquette :** Maryvonne Marconville (19 28) • **Ont collaboré à ce numéro :** Michèle Bourgeois, Antoine Cappelle, Aline Gerstner, Françoise Roux • **Responsable fabrication :** Christophe Perrusson (19 10) • **Activités numériques :** Bertrand Clare (19 08) • **Ressources humaines :** Agnès Cavanié (19 71) • **Communication :** Nelly Chirio (19 70) • **Directeur des ventes et promotion :** Valéry-Sébastien Sourieau (19 11) • **Vente messageries VIP-diffusion :** Frédéric Vinot • numéro vert 0800 51 49 74 • **Responsable gestion abonnements :** Isabelle Parez (19 12) • **Responsable du marketing direct :** Linda Pain (19 14) • **Responsable administratif et financier :** Vincent Gentric (19 18) • **Comptabilité :** Teddy Merle (19 15) • **Diffusion librairies :** DIF'POP'. Tél. : 0143620807 Fax : 0143620742 • **Régie publicitaire :** Médiaobs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris. Tél. : 01 44 88 97 70. Fax : 01 44 88 97 79 • e-mail : pnom@mediaobs.com • **Pour joindre directement une personne,** composez le 01 44 88, suivi des quatre chiffres placés après son nom. • **Directeur général :** Corinne Rougé (93 70) • **Directeur commercial :** Jean-Benoît Robert (97 78) • **Directeur du pôle Sciences :** Sylvain Mortreuil (97 75) • **Partenariats :** Karine Grossman (89 08) • **Studio/Maquette/Techniques :** Cédric Aubry (89 05) • **Imprimerie :** G. Canale & C., Via Liguria 24, 10071 Borgaro (TO), Italie. Dépôt légal à parution.

Les titres, les intertitres, les textes de présentation et les légendes sont établis par la rédaction du mensuel. La loi du 11 mars 1957 interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite (article L.122-4 du Code de propriété intellectuelle). Toute copie doit avoir l'accord du Centre français du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél. : 01 44 07 47 70. Fax : 01 46 34 67 19). L'éditeur s'autorise à refuser toute insertion qui semblerait contraire aux intérêts moraux ou matériels de la publication. Commission paritaire : 0919 K 85863. ISSN 0029-5671. CRÉDIT COUVERTURE : UMNOLA/SHUTTERSTOCK

GIL LEFAUCONNIER

entretien avec

Fabiola Gianotti

Le 4 juillet 2012, Fabiola Gianotti annonce la découverte du boson de Higgs, à laquelle elle a largement contribué. Aujourd'hui aux commandes du Cern, elle est sur la piste d'une nouvelle particule qui, si elle se confirmait, représenterait une avancée majeure dans notre compréhension de l'Univers.

“Trouver des particules inédites permettrait de récrire les tables de la physique ”

Propos recueillis par Olivier Dessibourg

THE ATLAS EXPERIMENT/CERN

Fabiola Gianotti, ici dans l'accélérateur de particules du Cern, à Genève, est la première femme à la tête du prestigieux laboratoire.

Sur scène en robe rouge au milieu des queues-de-pie pour recevoir avec ses collègues physiciens le prix de physique fondamentale, doté de trois millions de dollars, elle a marqué les esprits. C'était en 2013, un an après la découverte du boson de Higgs. Une révolution scientifique à laquelle Fabiola Gianotti a largement contribué puisqu'elle travaille au Cern, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, depuis près de trente ans. Aujourd'hui, plus besoin d'un habit ou d'une distinction pour sortir du lot : la physicienne de 55 ans dirige depuis janvier dernier cette organisation créée voici plus de soixante ans. Acceptant d'être « starifiée » pour donner de la visibilité à son domaine – elle a figuré parmi les 100 personnes les plus influentes de l'année 2012 selon le magazine *Time* –, celle qui s'est d'abord passionnée pour la philosophie et le piano se dit prête à servir d'exemple pour montrer que les femmes ont leur place dans la recherche, surtout en physique.

La Recherche **Le Grand Collisionneur de hadrons (LHC), dont la puissance a été doublée, vient d'être remis en service. Cet instrument a été construit pour découvrir le boson de Higgs, la particule qui attribue leur masse à toutes les autres ; ce qu'il a fait en 2012 (1, 2). Maintenant, vous cherchez un peu sans savoir où aller : cette quête, devenue plus empirique, est-elle plus compliquée ?**

Fabiola Gianotti Cette démarche n'est pas nouvelle. Lorsque nous avons lancé le LHC, en 2009, nous ne traquions pas que le « Higgs ». Nous étions déjà ouverts à tout, sans savoir à quelles questions nous allions pouvoir répondre en premier. Et l'on a trouvé le boson de Higgs, clé de voûte de la théorie qui décrit les particules élémentaires (le modèle standard), plus vite que je ne le croyais. Mettre au jour des particules inédites permettrait désormais de récrire complètement les tables de la physique. L'enjeu est passionnant. •••

BIO

29 OCTOBRE 1960 Fabiola Gianotti naît à Rome, en Italie.
1982 Elle obtient un diplôme professionnel de pianiste au conservatoire de Milan.
1987 Elle rejoint le Cern.
1989 Elle décroche son doctorat en physique des particules à l'université de Milan.
2009 À 2013 Elle est porte-parole de l'expérience Atlas, au Cern, et coordonne 3000 chercheurs.
4 JUILLET 2012 Elle annonce, au nom d'Atlas, la découverte du boson de Higgs.
2013 Colauréate, avec ses collègues du Cern, du prix de physique fondamentale.
2013 Nommée au Comité consultatif scientifique de l'ONU.
2014 En novembre, nommée directrice générale du Cern, entrée en fonction au 1er janvier 2016.

••• Fin 2015, des données observées dans deux des détecteurs du LHC ont indiqué l'existence possible d'une particule six fois plus massive que le Higgs. Êtes-vous déjà sur une piste ?

Ce que l'on a observé n'est pas encore concluant. Il faut attendre les données qui seront acquises cette année pour voir s'il s'agit d'une nouvelle particule ou si l'on est en présence de simples fluctuations statistiques. J'ai déjà vu plusieurs fois dans ma carrière des situations similaires, où les espoirs ont été déçus. Mais dans le cas contraire, nous aurons la possibilité d'étudier en détail cette particule inédite et d'élaborer une théorie sous-jacente. Si cela se confirmait, ce serait une percée très importante pour la physique. Alors que le boson de Higgs était un peu la dernière pièce manquante du modèle standard, une nouvelle particule ayant une masse autour de 750 giga-électronvolts serait la première à ne pas rentrer dans le tableau de ce que l'on connaît, et ouvrirait la voie vers une théorie plus large, ce que nous appelons « la nouvelle physique ». Avec le redémarrage du LHC au mois de mai, de nouvelles données nous permettront bientôt d'y voir plus clair, et d'en dire plus sur la nature d'une telle particule éventuelle.

Vu du Cern, quelles sont les grandes questions de la physique d'aujourd'hui ?

On s'interroge beaucoup sur la structure et l'évolution de l'Univers. Un seul chiffre traduit notre ignorance : 95 % du contenu de l'Univers est dit « sombre », tandis que la matière ordinaire que nous connaissons (planètes, étoiles et tout ce que nous voyons dans l'Univers) n'équivaut qu'à 5 %. Cette composante sombre de l'Univers se partage entre un quart de « matière sombre » dont la nature est inconnue, le reste étant composé d'« énergie sombre », encore plus mystérieuse. Sur la matière sombre, le LHC a son mot à dire, car il a un grand potentiel pour découvrir des particules massives interagissant faiblement (dites « Wimps », acronyme pour Weakly Interacting Massive Particles), constituants putatifs de cette matière. Autre exemple : on pense que la matière et l'antimatière ont été formées en quantité équivalente juste après le Big Bang. Or la seconde entité est aujourd'hui quasiment inexistante dans l'Univers. Où se trouve-t-elle ? Qu'est-il arrivé ? On l'ignore. L'expérience LHCb par exemple, située sur le LHC, explore les légères différences qui existent entre matière et antimatière grâce à l'étude d'un type de particule appelé « quark beauté » ou « quark b ». Au-delà du LHC, des expériences complémentaires sont développées au Cern auprès de notre Décélérateur d'antiprotons, une installation unique au monde où l'on est capable de piéger de l'antimatière afin de l'étudier.

Et la supersymétrie, théorie selon laquelle chaque particule connue possède une particule-miroir, plus massive, peut-elle aussi expliquer la nature de la matière sombre ?

Plus qu'une question, la supersymétrie est une réponse aux questions précédentes. C'est un prolongement du modèle standard, qui vise à combler certaines de ses lacunes, et prédit que chacune de ses particules est associée à un « superpartenaire », un nouveau type de corpuscule non observé jusque-là. C'est une belle théorie. Et pas uniquement pour des raisons esthétiques – ses équations sont « élégantes », je trouve. Mais aussi parce qu'elle permettrait de résoudre nombre de problèmes. Or peut-être la nature envisage-t-elle les choses autrement… Nous exploiterons le LHC pour rechercher des particules supersymétriques, et d'autres prévues par d'autres théories, mais aussi pour tenter de voir ce que la nature a à nous dire.

Cette démarche vers l'inconnu est-elle plus délicate à expliquer au public ?

Pas vraiment. Et c'est justement cela, la recherche ! Si l'on savait à l'avance ce que l'on allait trouver, ce n'en serait plus. La recherche sert à fouler des territoires vierges, en gardant en tête des questions qui nous guident et motivent les investissements. Certaines questions sont évidentes et d'autres encore inconnues. Combien de découvertes cruciales pour l'humanité n'ont-elles pas été faites avec ce simple courage de se lancer dans l'exploration ?

Alors que l'anneau de 27 kilomètres de circonférence du LHC n'a que sept ans, on parle déjà d'un accélérateur géant de 100 kilomètres, le Futur Collisionneur circulaire (FCC) (3). Cette démesure est-elle bien raisonnable ?

Le LHC, imaginé dans les années 1980, n'a été fonctionnel qu'à partir de 2009. Il faut de vingt-cinq à trente ans pour faire aboutir une idée si ambitieuse. C'est encore plus vrai pour le futur. Il n'est donc pas trop tôt pour commencer à réfléchir aux motivations scientifiques pour de nouveaux projets.

La course vers le gigantisme des instruments scientifiques est-elle inéluctable ? Des technologies inédites ne permettront-elles pas d'envisager des machines plus petites ?

Absolument. Nous avançons dans plusieurs directions. Comme celle des aimants supraconducteurs permettant de fournir un champ magnétique – qui

courbe la trajectoire des particules – plus intense ; les accélérateurs deviennent alors d'autant plus petits que ces aimants sont puissants. Sur le long terme, nous travaillons aussi sur de nouvelles techniques d'accélérations. Le projet Awake en est un exemple concret. Fondé sur la physique des plasmas – cet état de la matière très chaud formé de particules chargées (ions et électrons) –, il vise à accélérer les particules à une vitesse faramineuse sur des distances très courtes – de l'ordre du mètre ou de quelques dizaines de mètres au plus –, réduisant ainsi la taille finale de l'accélérateur. L'idée est de créer une onde dans un plasma à l'aide d'un faisceau de protons, puis d'injecter des électrons qui profitent alors de cette onde pour être accélérés, de la même manière qu'un surfeur d'abord statique sur l'eau acquiert de la vitesse lorsqu'il surfe sur une vague.

Dans le monde de la physique des particules, un acteur volontariste se profile – la Chine – qui ambitionne de construire son propre accélérateur géant. Le centre de gravité de ce domaine va-t-il glisser de Genève vers l'Asie ?

La Chine montre de l'intérêt pour notre discipline, c'est très positif. Mais je ne parlerais pas de glissement de centre de gravité. Les grandes questions en physique sont si nombreuses qu'une seule région du monde ne peut les affronter toutes en même temps : cela demanderait trop de ressources financières, humaines ou technologiques. L'idée est de se répartir les approches entre l'Europe, l'Asie et les États-Unis. Par exemple, ces derniers accueilleront la majeure partie de la physique des neutrinos ces prochaines décennies. En tant que directrice, je me battrai pour que le Cern et l'Europe aient un projet ambitieux et motivant. Avec la Chine, tout en essayant de couvrir des aspects complémentaires, nous aurons alors peut-être une compétition, mais elle sera saine.

Cela n'empêche pas le Cern d'envisager de construire un instrument pour traquer des neutrinos d'un nouveau type, appelés « stériles ».

L'expérience SHiP (Search for Hidden Particles, ou Recherche de particules cachées), en projet au Cern, n'a pas encore été approuvée. Elle ne vise pas seulement à étudier l'existence de neutrinos stériles. Un tel instrument permettrait de chercher des particules qui interagissent de façon très faible avec les corpuscules standards. Ces particules, qui ont été prédites par un grand nombre de modèles récemment élaborés, contribueraient à expliquer la nature de la matière sombre. Cette expérience serait donc complémentaire au vaste programme développé au Fermilab, aux États-Unis, autour des neutrinos.

Est-il plus ardu de légitimer aujourd'hui ces investissements massifs dans une science très fondamentale ?

Il faut remettre le débat dans de justes proportions. Le LHC a été construit dans le cadre d'un budget constant du Cern, soit un milliard de francs suisses par an environ. Ce budget équivaut à celui d'une université européenne moyenne. Ou à un cappuccino par citoyen européen par an… Ce n'est pas énorme comparé aux investissements dans d'autres secteurs. Par ailleurs, ces grands projets nous poussent à élaborer des technologies d'avant-garde (en cryogénie, en techniques du vide, en informatique, en électronique, etc.) qui sont ensuite transférables en applications pour la société. L'exemple le plus connu est le Web, créé au Cern en 1989, et qui a permis entre autres de diffuser l'information à des milliers de gens restés à l'écart des avancées scientifiques. De même, des accélérateurs sont aujourd'hui utilisés pour traiter des cancers, avec la thérapie par les hadrons [un type de particules, NDLR], différents des rayonnements habituels. Autre exemple : des panneaux solaires très performants sont mis au point grâce à des technologies du vide issues du Cern ; 300 d'entre eux équipent l'aéroport de Genève.

« Un seul chiffre traduit notre ignorance : 95 % du contenu de l'Univers est dit « sombre », c'est-à-dire de nature inconnue »

Ces applications sont-elles le plus important ?

Pour moi, le plus important est ailleurs : la recherche fondamentale sert à faire progresser la connaissance. Or si l'homme a un cerveau plus développé que celui des animaux, c'est son devoir de l'exercer – et il en a aussi besoin. C'est ce qui a motivé les premiers hominidés ayant peuplé la Terre à arpenter le monde, à aller chasser, mais aussi à peindre sur les parois des cavernes. La soif de connaissance et la créativité sont les manifestations les plus remarquables de notre cerveau et, avec l'art, elles font partie des aspirations fondamentales de l'homme. Enfin, l'histoire démontre que, sans recherche fondamentale, tôt ou tard, le progrès sature. La lumière des néons de cette •••

••• salle [du Cern, dans laquelle est réalisée cette interview, NDLR] n'est pas le fruit de la seule amélioration incrémentale des bougies. Il faut parfois des sauts majeurs dans la connaissance, que seule permet la recherche fondamentale.

Mais la quête de nouveaux savoirs est-elle justifiable à n'importe quel prix ?

Elle est justifiable à un prix que l'on peut assumer en tenant compte d'autres nécessités de l'humanité. Mais l'on observe que les pays les plus vertueux investissent 2 à 3 % de leur PIB dans la recherche ; ce n'est pas hors norme. Au sein du Comité consultatif scientifique de l'ONU dont je fais partie [un organe de 26 experts de divers domaines qui a pour tâche de conseiller le Secrétaire général sur les sciences, NDLR], ce sont d'ailleurs ces valeurs que nous conseillons à tous les pays de prévoir pour le soutien à la science, tant les bénéfices pour l'humanité peuvent être importants. Je suis heureuse de remarquer que l'oreille à nos recommandations n'est plus seulement polie, mais attentive. Et que les politiciens tendent de plus en plus à prendre des décisions fondées sur la science, dans certains domaines du moins, comme celui du climat. Même si, c'est vrai, le cycle des politiciens, qui veulent voir vite l'impact de leurs actions, n'est pas toujours compatible avec le rythme de la recherche fondamentale, inscrite dans le long terme. Car si l'idée de couper dans le financement de la recherche peut séduire à court terme, pour équilibrer les budgets, elle pénalise sur la durée. Un pays se restreignant à acheter des compétences techno-scientifiques à l'étranger sans soutenir leur développement chez lui se prive aussi de retours économiques substantiels. En ce qui concerne le Cern uniquement, chaque franc suisse ou euro investi par ses deux pays hôtes, la Suisse et la France, en rapporte entre deux et six, sous différentes formes.

> **“ Notre ambition est aussi de jouer le rôle de « facilitateur de paix », en réunissant autour d'un projet des chercheurs de tous les pays, dont certains en guerre ”**

Une étude parue en 2015 (4) vous donne raison puisqu'elle a chiffré à 3 milliards d'euros, d'ici à 2025 et l'arrêt programmé du LHC, le bénéfice net que la machine aura généré.

C'est vrai. Il faut aussi inclure d'autres aspects, liés à l'éducation : un tiers des 12 500 scientifiques impliqués dans les projets du Cern sont des jeunes en formation. La moitié restera dans la recherche tandis que l'autre moitié rejoindra les milieux industriels, financiers, etc. Et la valeur de la formation est difficile à chiffrer. L'impact global du LHC va au-delà des seules technologies qui y sont liées.

Le public montre beaucoup d'intérêt pour vos activités. Preuve en sont les journées portes ouvertes du Cern, toujours très courues ; 70 000 personnes sont venues en 2013. Comment expliquer ce succès ?

La quête de la connaissance, même fondamentale, est un des désirs innés de l'homme. De plus, le public associe au Cern une idée de paix, tant nos objectifs, nos idéaux véhiculent des valeurs universelles se situant au-dessus de l'intérêt propre d'individus, de sociétés, de politiciens. Les gens, d'où qu'ils viennent, ont soif de ces valeurs. Cela est d'autant plus vrai dans une société très matérialiste et insécuritaire. Et il est vrai que l'une de nos ambitions est de jouer le rôle de « facilitateur de paix ». Comme dans le projet Sesame de synchrotron à Amman, la capitale de la Jordanie, qui réunit des chercheurs de tous les pays de la région, dont certains en guerre. Comme nombre d'autres synchrotrons, Sesame permet la génération de différents rayonnements (X surtout, mais aussi infrarouges), qui sont utilisables pour ausculter l'intérieur de la matière. Que cela soit clair : nous ne sommes pas les Nations unies. Ce que nous pouvons faire, c'est favoriser les coopérations fondées sur la science, l'éducation, le développement commun de technologies.

Et vous, qu'est-ce qui a motivé la passionnée de philosophie que vous étiez, jeune, à étudier la physique ?

La curiosité. Un trait distillé par mon père géologue, avec qui je partage l'amour pour la nature. Les grandes questions philosophiques m'intriguaient. Mais j'ai eu le sentiment que, sans même savoir exactement ce qu'était la physique, cette branche serait plus à même de me fournir des réponses. ■

Pour en savoir plus

- O. Dessibourg, « Annoncer le boson de Higgs a été une émotion indescriptible », portrait de Fabiola Gianotti, *La Recherche*, mai 2014, p. 68.
- P. Minet, « Le boson de Higgs enfin dévoilé », *La Recherche*, septembre 2012, p. 8.

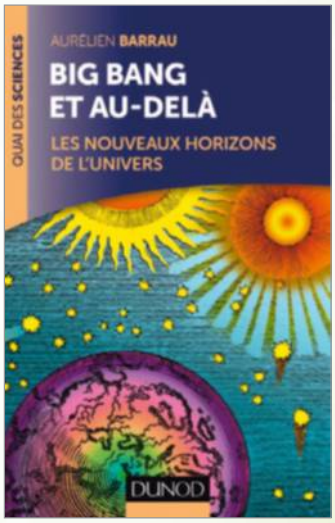
(1) G. Aad *et al.* (Atlas collaboration), *Physics Letters B, 716, 1, 2012.*

(2) S. Chatrchyan *et al.* (CMS collaboration), *Physics Letters B, 716, 30, 2012.*

(3) https://fcc.web.cern.ch/Pages/default.aspx

(4) M. Florio *et al.*, arXiv.org, arXiv:1507.05638.

VARIEZ LE **PLAISIR** DES **SCIENCES**

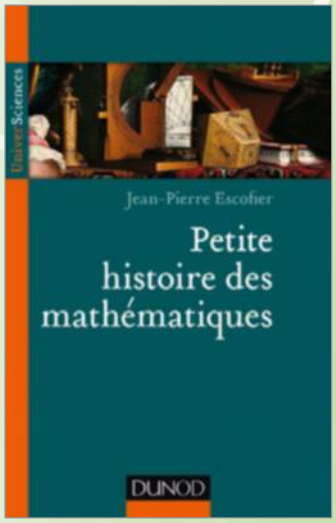


A. BARRAU
9782100743704 ▪ 176 pages ▪ **16 €**

Les piliers et les énigmes du Big Bang sont abordés les uns après les autres, à la manière d'une balade aux origines de l'Univers.

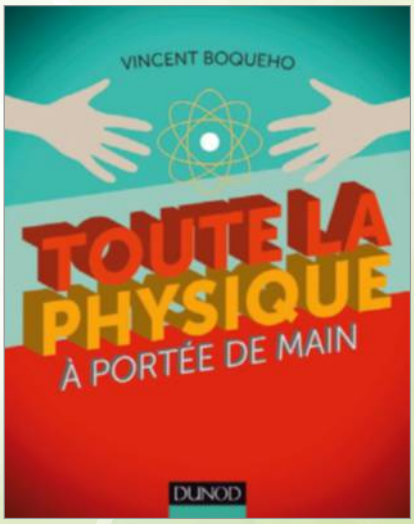
A. BARRAU
9782100746606 ▪ 96 pages ▪ **11,90 €**

Aurélien Barrau propose un cheminement exigeant, mais accessible à tous, pour tenter de définir la science et comprendre son articulation à la vérité.



J.-P. ESCOFIER
9782100747061 ▪ 224 pages ▪ **17,90 €**

Voici une petite histoire des mathématiques, jalonnée de portraits de mathématiciens et de mathématiciennes, pour découvrir les grandes idées qui ont façonné l'univers des mathématiques.



V. BOQUEHO
9782100738359 ▪ 544 pages ▪ **23 €**

Ce livre unique vous rendra limpides tous les phénomènes de notre quotidien, et bien au-delà, jusqu'à tutoyer l'essence de l'Univers…

A. EL ALBANI
9782100737918 ▪ 232 pages ▪ **22 €**

Partez à l'aventure avec les géologues qui ont fait une découverte stupéfiante : des fossiles qui remettent en cause toute l'histoire jusque-là admise de l'émergence de la vie sur Terre !

P. HALPERN
9782100744206 ▪ 320 pages ▪ **22 €**

Découvrez la quête d'Albert Einstein et d'Erwin Schrödinger, alliés puis concurrents, pour parvenir à une « théorie du tout » qui transcende les bizarreries du monde quantique.

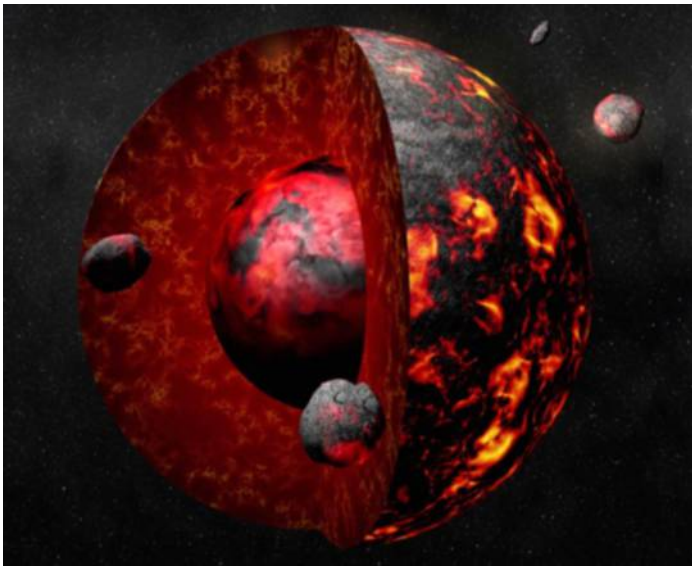
Réalisation : WIP

www.dunod.com

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS

sommaire/mai 2016 - n°511

▲ **ÉVÉNEMENT :** *Disparition anticipée de l'homme de Florès*



▲ **DOSSIER :** *Le champ magnétique terrestre, une sacrée dynamo*

3 **ÉDITO**

4 **ENTRETIEN AVEC FABIOLA GIANOTTI**
« Trouver des particules inédites permettrait de récrire les tables de la physique »
Propos recueillis par Olivier Dessibourg

12 **ILS ONT PARTICIPÉ À CE NUMÉRO**

14 **COURRIER**

16 **L'ÉVÉNEMENT** Le Hobbit s'est éteint il y a 60 000 ans
Anne Debroise

20 actualités

20 **EN BREF**

22 **Physique des matériaux** Récupérer l'eau en imitant la nature

23 **Santé** Jean-Daniel Lelièvre : *« Les recherches d'un vaccin thérapeutique contre le sida sont encore en phase exploratoire »*

24 **Astronomie** Le Système solaire interne vidé par Jupiter

25 **Biologie** Pourquoi les mitochondries ont perdu une partie de leur ADN

26 **Physique** L'algorithme de Shor progresse

28 **Astrophysique** Le voile se lève sur les particules les plus énergétiques de l'Univers

30 **Neurosciences** Carte en 3D des réseaux neuronaux

31 **Intelligence artificielle** Comment prédire les propriétés des polymères ?

32 **Éthologie** Étrange rituel chez les chimpanzés

33 **LA CHRONIQUE MATHÉMATIQUE**
Des mathématiciens pour coacher les sportifs *Roger Mansuy*

Retrouvez *La Recherche* sur RFI dans l'émission « Autour de la question », le 4 mai à 16 heures

rfi www.rfi.fr

34 dossier

CHAMP MAGNÉTIQUE

LA TERRE PERD-ELLE LE NORD ?

36 Chronique d'une inversion annoncée
Sylvain Guilbaud

42 Une dynamo au centre de la Terre
Marine Bollard

45 L'énigme du champ magnétique primitif
Philippe Pajot

S.PLAILLY, EDAYNES / LOOKATSCIENCES - JOEL DYON/IPGP

▲ **FONDAMENTAUX :** *Les tsunamis se suivent et se ressemblent*

▲ **IDÉES :** *Le monde à la merci des algorithmes*

HANDOUT / REUTERS - ILLUSTRATION : HERVÉ PINEL

50 fondamentaux

50 **ARCHÉOLOGIE** Le tsunami de Fukushima, un scénario qui se répète
Rafaële Brillaud

55 **BIOLOGIE** Des bactéries programmées pour détecter les maladies
Jérôme Bonnet

62 **TCHERNOBYL** L'impact des rayonnements à faible dose *Christelle Adam-Guillermin, Jean-Marc Bertho, Philippe Lestaevel et Maâmar Souidi*

69 **ÉPIDÉMIOLOGIE** Quand les migrants contractent le sida en France
Annabel Desgrées du Loû

78 **HISTOIRE DES SCIENCES** Gerbert d'Aurillac, le pape des chiffres arabes *Michel Mitov*

81 idées

81 **ALGORITHMES** Futurs maîtres du monde ?

82 **MATIÈRE À PENSER** Comment les algorithmes envahissent notre quotidien *Vincent Glavieux*

86 **DÉBAT DOMINIQUE CARDON ET MOULOUD DEY** Faut-il réguler l'usage des algorithmes ?
Propos recueillis par Vincent Glavieux

88 **L'ŒIL DU PHILOSOPHE** Les algorithmes peuvent-ils tout résoudre ?
Jacques Dubucs

92 guide

92 **LIVRES** La sélection du mois

96 **AGENDA** Les manifestations scientifiques

98 **LA QUESTION DE LA FIN** Pourquoi a-t-on faim ?
Gautier Cariou

www.larecherche.fr

RECHERCHER
Les archives du magazine
Les sujets qui vous intéressent dans une base de plus de 20 000 articles.

S'INFORMER
L'actualité de la recherche
Retrouvez le blog des livres et l'agenda des manifestations scientifiques.

ACHETER
Abonnement et vente d'anciens numéros
Livres sélectionnés par *La Recherche*
Les outils du chercheur.

La Recherche sur Twitter... Rejoignez-nous sur Twitter pour un éclairage original sur la science et les technologies. http://twitter.com/maglarecherche

Ce numéro comporte un encart abonnement *La Recherche* sur les exemplaires kiosque France et étranger (hors Suisse et Belgique), un encart abonnement Edigroup sur les exemplaires kiosque Suisse et Belgique.

ils ont participé à ce numéro

Christelle Adam-Guillermin

ÉCOTOXICOLOGUE

À l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, elle étudie les effets de la radioactivité sur l'environnement, notamment les dommages à l'ADN et le stress oxydant, qui peuvent annoncer des effets plus larges sur la faune et la flore. Des recherches qui l'ont menée à Tchernobyl et Fukushima. ■

Jean-Marc Bertho

IMMUNO-HÉMATOLOGUE

Jean-Marc Bertho travaille sur les systèmes immunitaires et hématopoïétiques à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. Préoccupé par la protection des populations en cas d'accident nucléaire, il collabore avec une équipe biélorusse sur la culture et l'éducation en radioprotection. ■

Jérôme Bonnet

BIO-INGÉNIEUR

C'est à Stanford que Jérôme Bonnet a commencé à mettre au point des circuits génétiques permettant de « programmer » les cellules vivantes. Aujourd'hui, au Centre de biochimie structurale de Montpellier, il se consacre à l'ingénierie de cellules « intelligentes » pour des applications médicales. ■

Annabel Desgrées du Loû

DÉMOGRAPHE

Nourrie d'une formation en biologie et en sciences sociales, Annabel Desgrées du Loû est directrice de recherche au Ceped. Elle étudie les comportements de santé des populations en faisant dialoguer les approches biomédicales et les sciences humaines et sociales. ■

Olivier Dessibourg

JOURNALISTE

Physicien et enseignant de formation, Olivier Dessibourg est journaliste scientifique de presse écrite depuis seize ans. Plusieurs fois primé pour ses articles, il préside l'Association suisse du journalisme scientifique (forte de 350 membres) et enseigne le journalisme scientifique en Suisse. Féru des grands espaces, il se livre aussi à la photographie. ■

Jacques Dubucs

PHILOSOPHE DES SCIENCES

Docteur en logique et philosophie, Jacques Dubucs est directeur de recherche dans le tout nouveau laboratoire « Sciences, normes et décision » (CNRS/Paris-Sorbonne). Il a longtemps enseigné les mathématiques à l'étranger avant de revenir en France et de se consacrer à la philosophie des sciences. ■

Étienne Ghys

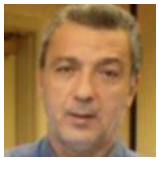
MATHÉMATICIEN

« J'essaye de promouvoir les maths autant que possible », explique Étienne Ghys. Un objectif qui s'est concrétisé par la création, il y a sept ans, du site internet Images des Mathématiques. Géomètre, directeur de recherche CNRS à l'École normale supérieure de Lyon, il s'intéresse particulièrement aux systèmes dynamiques. ■

Philippe Lestaevel

NEUROTOXICOLOGUE

À l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, il dirige des travaux sur les liens entre les désordres comportementaux et les mécanismes sous-jacents qui expliquent ces désordres, suite à des expositions chroniques de radionucléides à faibles doses, comme ceux retrouvés après Tchernobyl. ■



Maâmar Souidi

BIOLOGISTE

Maâmar Souidi travaille à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, sur l'impact des faibles doses de rayonnements ionisants sur le métabolisme et l'ADN. Il étudie en particulier le risque héréditaire des effets biologiques après exposition à faible dose aux radionucléides. ■

Laurent Nespoulous

ARCHÉOLOGUE

Maître de conférences à l'Inalco, Laurent Nespoulous est l'auteur des photos de sites archéologiques japonais frappés par le tsunami de 2011 (p. 50). Il étudie à l'Institut français de recherche sur le Japon les enjeux entourant, notamment, les archéologies préhistorique, protohistorique et antique ainsi que l'archéologie préventive au Japon. ■

DR X 10

CONCOURS GÉNÉRATION DÉVELOPPEMENT DURABLE

12e Edition

INVENTER
POUR LE MONDE
DE DEMAIN

Participez à la cérémonie de remise de prix et découvrez les lauréats 2016

RENDEZ-VOUS LE 25 MAI
À 18H30 AU CNAM, PARIS

Informations et inscriptions :
www.concoursgenerationd2.com

UN ÉVÉNEMENT

La Recherche

AVEC LE SOUTIEN DE

cdefi · Conférence des Grandes Écoles · CPU Conférence des Présidents d'Université · Dunod · l'Etudiant · REFEDD

Design graphique : Agence **HYPNOZ** - Crédits photos : Shutterstock.

Adresse électronique : courrier@larecherche.fr

PHYSIQUE

LA LONGUE VIE DE L'ÉLECTRON

Vous écrivez que *« la limite inférieure de la durée de vie de l'électron est de 66 milliards de milliards de milliards d'années »* (*La Recherche* n° 508, p. 21). Je suis surpris qu'un tel chiffre puisse être avancé, tant la valeur annoncée paraît vertigineuse en regard des moyens humains permettant de la mesurer. Comment peut-on évaluer une durée aussi élevée alors que les phénomènes de détection se passent sur des temps extrêmement courts ?

Courriel de Patrice de Fréminville

Réponse de Didier Kryn, physicien **Nous étudions la désintégration de l'électron : si elle est possible, c'est un phénomène probabiliste, dont la probabilité est constante au cours du temps. Comme pour tous les phénomènes radioactifs, on exprime cette probabilité comme le temps au bout duquel l'électron a une chance sur deux de se désintégrer : c'est ce que l'on appelle la demi-vie, terme qui n'exprime qu'une analogie lointaine avec la vie des êtres vivants. On la mesure en considérant un grand nombre d'électrons, et en comptant combien d'entre eux se sont désintégrés au bout d'un temps donné. Si, au bout d'un certain temps, aucun électron ne s'est désintégré, on peut donner une limite minimale à cette durée de vie, d'autant plus grande qu'on a observé un grand nombre d'électrons. En l'occurrence, Borexino a observé 10^{32} électrons pendant plus de 400 jours.**

l'événement

Face aux pesticides, les abeilles s'adaptent

Une étude réalisée en conditions réelles démontre l'argument phare des semenciers : le fait que le nombre d'abeilles ne diminue pas près des champs traités aux néonicotinoïdes.

Anne Debroise, journaliste

Repères

DES SUPPOSÉS D'ÉVALUATION ÉTENDUES

UN PESTICIDE EN VOIE D'INTERDICTION ?

L'article « Face aux pesticides, les abeilles s'adaptent » (*La Recherche* n° 508, p. 16) indique que l'usage du pesticide Gaucho est *« suspendu en Europe depuis décembre 2013 »*. Il serait donc surprenant de retrouver aujourd'hui son principe actif, l'imidaclopride, dans le nectar des abeilles. Mais un amendement à la loi sur la biodiversité interdit à partir de 2016 l'usage des néonicotinoïdes, au motif que l'imidaclopride était encore autorisé. Et en 2013, l'Union européenne avait imposé des *« restrictions »* sur l'imidaclopride. L'usage de cette molécule semble donc restreint, mais pas interdit.

Commentaire de David Samson

Réponse de Steve Bäsel, responsable homologation gamme insecticide chez Bayer **En décembre 2013, la Commission européenne a mis en place un moratoire de deux ans sur trois néonicotinoïdes, dont l'imidaclopride. Il restreint leur usage à des cultures non attractives pour les abeilles, et à des usages professionnels. Les traitements de semences des céréales d'hiver et les traitements en serre ou effectués après floraison ne sont pas concernés. À la suite d'un appel à données de l'Autorité européenne de sécurité des aliments en 2015, ce moratoire est en cours de révision. Dans l'attente des conclusions attendues pour début 2017, les restrictions adoptées restent valables. En France, un amendement à la loi sur la biodiversité visant à interdire totalement les néonicotinoïdes en France à partir du 1er janvier 2016 a été adopté par l'Assemblée nationale, mais rejeté par le Sénat. Une seconde lecture discutera de nouveaux amendements. Ces substances restent autorisées en France à ce jour avec les restrictions en vigueur.**

ASTRONOMIE

PRÉDICTIONS TROP IMPRÉCISES

À propos de la *« découverte »* de Neptune par John Couch Adams (*La Recherche* n° 505, p. 76) : en 2003, l'analyse de documents de l'époque, cachés pendant des années, a apporté une lumière inédite, démontrant que les prédictions d'Adams étaient bien moins précises que clamé par les Anglais (et fort changeantes). Depuis, il n'y a plus aucun fondement à considérer Adams comme codécouvreur, à l'égal d'Urbain Le Verrier. Il serait par contre utile de mentionner Heinrich Louis d'Arrest aux côtés de Johann Gottfried Galle, vu sa contribution.

Courriel de Yaël Nazé, astrophysicienne à l'université de Liège

PHYSIQUE

DOUBLE TUTELLE

Dans notre article sur la genèse de la relativité générale (hors-série *La Recherche* n° 16, p. 18), précisons qu'il est faux d'écrire qu'Einstein est passé soudainement d'une stratégie physique à une stratégie mathématique. Cette double tutelle – mathématiques et physique – lui a au contraire permis de trouver les équations finales de la relativité générale, présentées le 25 novembre 1915 (1). Dans le

premier de ses articles de novembre 1915, Einstein abandonne les équations issues de la théorie intermédiaire de l'esquisse élaborées avec Marcel Grossmann en 1912. Il les remplace par des équations obtenues en changeant un seul élément à la théorie de l'esquisse. Ce candidat pour les équations du champ peut être déduit de la stratégie mathématique, mais il résulte aussi de la stratégie physique poursuivie pendant plusieurs années pour développer la théorie de l'esquisse.

■ **Courriel de Michel Janssen et Jürgen Renn, historiens des sciences**

(1) M. Janspellisen et J. Renn, *Nature, 527,* 298, 2015.

IDÉES

ÉTHIQUE PERSONNELLE

Votre dossier sur la fraude scientifique *(La Recherche* n° 506, p. 83) me fait dire que rien ne peut remplacer l'éthique personnelle. C'est vrai en sciences, en économie, et même en… politique. Quels que soient les moyens de contrôle de la performance du chercheur, il y en aura pour les contourner. Et plus un système est complexe, plus il est contournable. Quant à évaluer le mérite des chercheurs, la reconnaissance par les publications n'est pas le pire moyen par rapport à d'autres (l'avis du parrain de thèse ? d'un comité « indépendant » ?). Sur ces questions, André Comte-Sponville a écrit un livre très instructif, *Le capitalisme est-il moral ?* (Albin Michel, 2004). Il explique clairement la stratification : 1) « sciences » – la base ; 2) « législation » – qui délimite ce qu'on a le droit de faire ; 3) « éthique » – qui se situe au-dessus. Les trois niveaux se superposent, mais ne se mélangent pas.

■ **Courriel d'Alain Cruset**

CONFIRMATION GÉNÉTIQUE

L'article « Un nouvel arbre pour les oiseaux » (*La Recherche* n°506, p. 16) confirme que les faucons, versus les *Accipitres, Cathartae* et *Sagittariidae,* forment deux clades différents. Paul Géroudet, Leslie Brown et quelques systématiciens avaient déjà soutenu cette hypothèse, y compris sur des bases anatomiques **(1)**. L'article montre que les faucons et les rapaces nocturnes sont plus proches entre eux que les faucons ne le sont des précédents rapaces, également diurnes. Là encore, André Brosset et moi-même, sur la base d'une comparaison comportementale, avions formulé cette proximité faucons / nocturnes et l'éloignement faucons / *Accipitres, Cathartae* et *Sagittariidae* **(2)**. Ces hypothèses ne sont donc pas neuves. Sans doute la génétique moléculaire sera-t-elle mieux écoutée.

■ **Courriel de Christian Pacteau**

(1) Paul Géroudet, *Les Rapaces d'Europe,* Delachaux-Niestlé, 1965 ; Leslie Brown, *Les Oiseaux de proie,* Elsevier nature, 1977.
(2) A. Brosset, *Z. Tierpsychol., 32,* 386, 1973 ; Christian Pacteau, *L'Autour et l'Épervier,* Hécate, 1989.

PHYSIQUE

MASSE OU ÉNERGIE ?

Vous indiquez que la masse du neutron est de 939,57 méga-électronvolts, soit 0,93957 giga-électronvolt *(La Recherche* n° 507, p. 68). Or cette unité désigne une énergie, et non une masse. Est-ce une erreur ?

■ **Courriel de Charlène Pencolé**

Réponse d'Yves Sirois, physicien

Le gigaélectronvolt (GeV) est une unité d'énergie. L'électronvolt (eV) correspond à 1,6 x 10^{-19} joule en unité du système international (SI). Pour parler de masse, il faudrait diviser l'énergie par le carré de la vitesse de la lumière « c », selon l'équation $E = mc^2$. Manipuler ces unités n'est pas pratique, et les physiciens des particules aiment les choses simples. Ils utilisent donc un système fondé sur des unités « naturelles ». Cela consiste à fixer la vitesse de la lumière à 1. Ainsi, tout peut s'exprimer en GeV. L'unité d'énergie reste en GeV, et la masse passe de GeV/c^2 à GeV. Il suffit ensuite de se rappeler que la vitesse de la lumière est implicite pour repasser au SI.

ÉCONOMIE

RACCOURCIR LE TEMPS DE TRANSPORT

Dans l'entretien très intéressant qu'il vous a accordé, Marc Giget dit que la solution aux temps de transports croissants serait d'*« investir massivement dans les transports publics »* (*La Recherche* n° 508, p. 72). Or, d'après l'urbaniste Marc Wiel, l'accélération des transports tendrait plutôt à augmenter les distances qu'à raccourcir les durées. Le paradoxe mis en évidence par le mathématicien Dietrich Braess prend aussi le contre-pied de cette analyse, en démontrant qu'ajouter des voies à une route, ou accélérer une ligne, font basculer de plus en plus d'usagers dessus, et provoquent sa congestion à moyen terme. Il serait préférable d'investir dans un maillage de lignes « moins efficaces » mais plus denses et diverses.

■ **Courriel de Martin Lucas**

Erratum **Comme plusieurs lecteurs vigilants nous l'ont fait remarquer, l'histogramme publié dans *La Recherche* n° 508, p. 21 comporte une erreur. En effet, les rejets de carbone ne ralentissent pas, c'est leur vitesse d'augmentation qui diminue.**

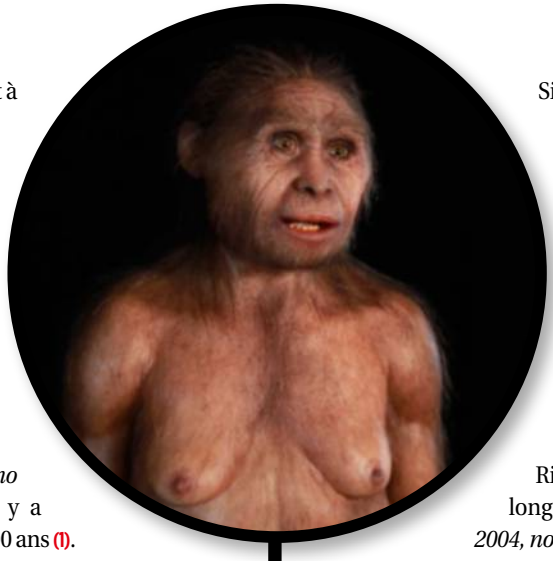
Sauf mention contraire de leur auteur, toute lettre parvenue à la rédaction de *La Recherche* est susceptible d'être éditée et publiée, en tout ou en partie, dans le journal. Les lettres concernant un auteur extérieur à la rédaction de *La Recherche* lui sont envoyées. Sans réaction de l'auteur dans un délai raisonnable, nous les considérons comme publiables en tout ou en partie, sans attendre une éventuelle réponse de sa part. Dans la mesure du possible, évitez les fax et les lettres manuscrites.

Le Hobbit s'est éteint il y a 60 000 ans

Un des mystères entourant l'espèce humaine naine de l'île de Florès vient d'être résolu. De nouvelles datations reculent le moment de sa disparition et modifient les termes de son éventuelle cohabitation avec *Homo sapiens.*

Anne Debroise, journaliste

Hasard ou coïncidence? C'est à la période où *Homo sapiens* colonisait les îles au sud de l'Asie qu'*Homo floresiensis,* l'étrange espèce humaine découverte dans la grotte de Liang Bua sur l'île indonésienne de Florès en 2003, s'est éteinte. De nouvelles fouilles ont en effet permis aux découvreurs de réécrire l'histoire du remplissage de la grotte et de réviser leurs premières datations. Contrairement à ce qu'ils pensaient en 2004, *Homo floresiensis* n'aurait pas disparu il y a 12 000 ans mais bien plus tôt, il y a 60 000 ans (1). *« Il s'agit d'un très beau travail de datation, très complet et dense »,* salue Florent Détroit, paléoanthropologue au Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) qui travaille en Asie du sud-est. Et ce travail redessine l'histoire énigmatique de celui que l'on surnomme affectueusement le « Hobbit », à cause de sa petite taille. Même s'il appartient indubitablement au genre *Homo,* il ne mesurait en effet pas plus de 1,10 mètre, et était doté d'un crâne étonnamment petit, capable de contenir un cerveau de la taille de celui d'un chimpanzé (environ 400 cm^3).



▲ *Reconstitution d'un* Homo floresiensis *femelle, à partir d'un crâne découvert dans la grotte de Liang Bua de l'île de Florès.*

Si ses traits suscitent de nombreuses conjectures (lire p. 19), une partie des controverses se concentraient jusqu'ici sur la date de sa disparition. On se demandait en effet comment *Homo sapiens* et *Homo floresiensis* avaient pu cohabiter aussi longtemps (environ 40 000 ans) sur des îles aux ressources limitées. Pour Florent Détroit, avancer une date de disparition à 12 000 ans en 2004 (2) était pour le moins prématuré. Richard Roberts, de l'université de Wollongong, en Australie, s'en explique: *« En 2004, nous avons rapporté ce que nous savions. Aujourd'hui, nous en savons davantage, notamment grâce à des techniques de datation qui n'existaient pas à l'époque, et nous pouvons mettre à jour nos observations. Pour moi, c'est un bel exemple de mise en pratique de la démarche scientifique. »*

L'âge de 12 000 ans qui avait été avancé est en réalité celui de morceaux de charbon, retrouvés de 75 à 180 centimètres des fossiles, à une profondeur équivalente (entre 4 et 7 mètres) sous le sol de la grotte. Le charbon présente l'avantage de pouvoir être daté en mesurant l'avancée de

S.PLAILLY, EDAYNES / LOOKATSCIENCES

Repères

- La disparition de l'homme de Florès, surnommé le « Hobbit », avait été estimée en 2004 à 12 000 ans.
- Des fouilles récentes dans les sédiments de la grotte de Liang Bua, en Indonésie, permettent de dater les ossements de ce petit hominidé d'au moins 60 000 ans.
- L'homme de Florès aurait disparu à l'époque où *Homo sapiens* colonisait la région. Mais on ignore s'ils se sont rencontrés.

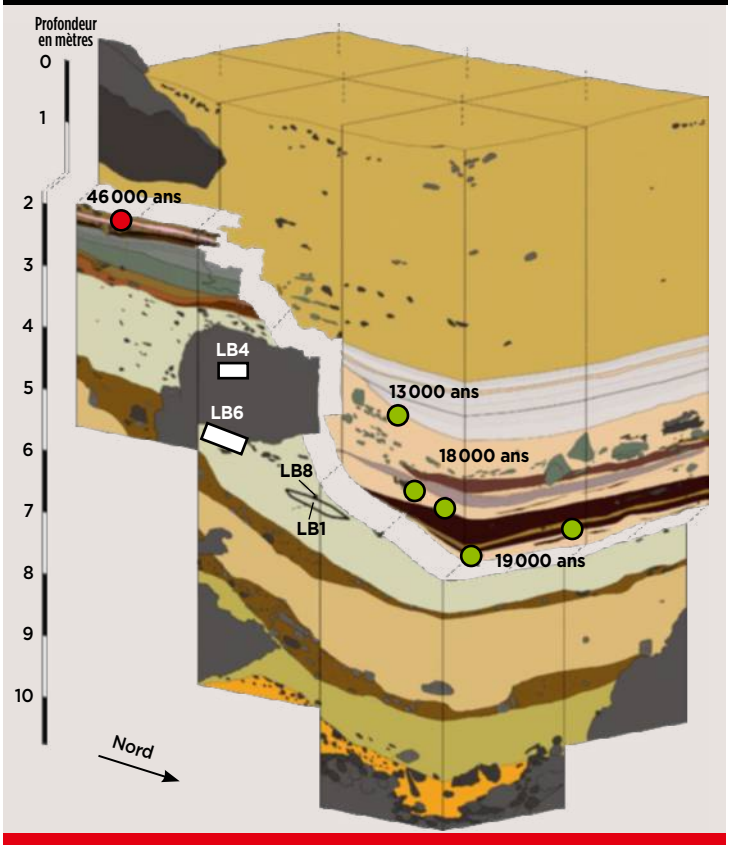
SMITHSONIAN 3D.SIEDU / LIANG BUA TEAM

la désintégration des atomes de carbone 14, une technique rodée depuis des décennies. En datant ce charbon, les paléontologues pensent donc dater les fossiles d'*Homo floresiensis*. Mais l'on ne peut attribuer le même âge à des restes rencontrés à la même profondeur que lorsqu'il y a une continuité sédimentaire, c'est-à-dire lorsque les couches de sédiments forment des strates horizontales. Or, à partir de 2007, de nouvelles fouilles suggèrent que la stratification de la grotte a été bien plus complexe qu'on ne l'imaginait. (Fig. 1)

« En élargissant nos fouilles, nous nous sommes rendu compte que les fossiles faisaient partie d'un ensemble de sédiments anciens, mais que cet ensemble était tronqué par une surface d'érosion qui descendait graduellement vers l'entrée de la grotte », décrit Thomas Sutikna, le principal auteur, de l'université de Wollongong et du centre d'archéologie d'Indonésie. La grotte de Liang Bua (« grotte fraîche ») s'ouvre largement sur le nord. Elle est dotée d'une cheminée naturelle et son remplissage est donc soumis à l'érosion, notamment en raison des pluies qui s'infiltrent. L'ensemble sédimentaire qui inclut les fossiles se trouve dans la zone la plus protégée des intempéries, au fond de la grotte, le long d'un mur. Cette zone préservée, d'environ 12 mètres sur 6, est surmontée d'une couche épaisse de 2 mètres de cendres volcaniques. Des traces d'éboulis indiquent qu'une grande partie des sédiments qui l'entouraient a été lessivée vers l'entrée de la grotte, entraînant la perte éventuelle d'autres fossiles. Puis, au cours des 20 000 années qui ont suivi, la pente a été comblée par de nouveaux •••

▲ *Les fouilles dans la grotte de Liang Bua s'accompagnent depuis 2009 de techniques de datation nouvelles. Les couches sédimentaires sont soumises à de multiples tests.*

Fig. 1 Dans les profondeurs de Liang Bua



▲ *Dans la grotte de Liang Bua, plusieurs restes humains attribués à l'homme de Florès ont été exhumés (LB1, LB4, LB6 et LB8). La datation des charbons retrouvés aux mêmes profondeurs (points verts) faisait remonter cette espèce humaine naine à 12 000 ans. Un phénomène d'érosion et de remplissage (la zone blanche est la limite de l'érosion) fait que, bien qu'à la même profondeur, les charbons sont en fait beaucoup plus jeunes que les ossements qui sont maintenant datés d'au moins 60 000 ans.*

••• sédiments, et la grotte a été occupée par d'autres populations, probablement des *Homo sapiens*. Les charbons, tout en étant à la même profondeur, faisaient partie de ces couches sédimentaires plus jeunes.

Pour y voir plus clair sur l'histoire stratigraphique de la grotte, l'équipe a entrepris de faire subir à cet ensemble sédimentaire une batterie de tests. Ils ont daté plusieurs matériaux à l'aide de différentes techniques. Plus question visiblement de laisser de place au doute! Les téphras (éjectas de volcans) qui surplombent les fossiles sont datés en mesurant la présence d'argon liée à la désintégration du potassium 40 d'environ 46 000 ans. Une méthode de luminescence infrarouge élaborée en 2011 (qui consiste à mesurer le temps depuis lequel les grains de feldspaths inclus dans le sédiment ne sont plus exposés à la lumière solaire), est utilisée pour dater les sédiments qui entourent les fossiles. Ceux-ci affichent entre 65 000 et 71 000 ans.

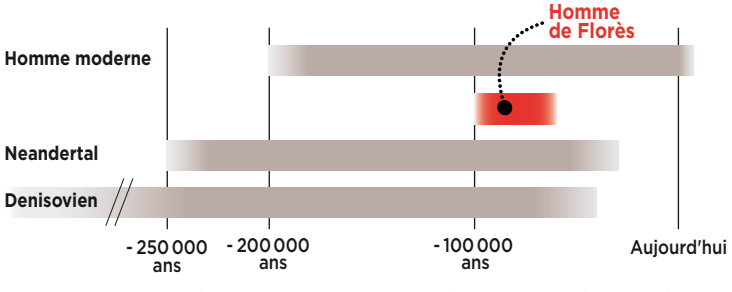
DATATION PAR LA MÉTHODE URANIUM-THORIUM

Les planchers stalagmitiques au-dessus des fossiles et les fossiles eux-mêmes sont également passés au crible. La calcite des stalagmites et l'apatite (*) des os et des dents contiennent de l'uranium 234, radioactif, qui se désintègre en thorium 230. Sa période radioactive – le temps au bout duquel la moitié des noyaux d'uranium se désintègrent en thorium – est de 245 000 ans. Et le thorium 230, également radioactif, a lui une période de 75 000 ans, une durée bien adaptée pour évaluer les âges considérés. Sauf que cette technique de datation était jusqu'à récemment très délicate à utiliser. D'abord parce que l'uranium n'est présent qu'en faible quantité dans les échantillons, mais pas seulement. La datation radio-isotopique repose sur le principe selon lequel, au moment de la fossilisation, le système contenant un noyau radioactif se ferme aux échanges extérieurs. Connaissant la vitesse à laquelle ce noyau se désintègre en un autre noyau (noyau-fils), et connaissant les conditions initiales, la proportion de ces deux noyaux permet d'estimer l'âge de l'échantillon. Or la datation des os et des dents à l'aide de l'uranium ne suit pas ce schéma. Comme l'indique Jean-Jacques Bahain, du MNHN : « *Le problème dans le cas des os et des dents, c'est qu'ils peuvent continuer à absorber l'uranium présent dans l'environnement pendant la fossilisation après l'enfouissement. Il faut donc pouvoir modéliser l'absorption d'uranium au fil du temps dans chaque échantillon en multipliant les analyses de l'extérieur vers l'intérieur de l'échantillon* ».

Un travail minutieux…

Pour le réaliser, l'équipe fait appel à Rainer Grün, archéogéochimiste à l'université de Canberra, en Australie, précurseur dans le domaine de la datation d'os par la méthode uranium-thorium. Pour ne pas trop endommager les précieux fossiles, il utilise un système de micro-ablation laser, qui vaporise de petites quantités de

Cohabitation du Hobbit et des autres espèces humaines



▲ *Une chose semble désormais sûre : ces quatre espèces humaines étaient présentes en Asie du sud-est il y a 60 000 ans. Reste à savoir si elles se sont rencontrées.*

INFOGRAPHIES : MICHÈLE BOURGEOIS - LIANG BUA TEAM

matière pour l'analyse. Sa méthode lui permet d'attribuer aux fossiles des âges entre 60 000 ans et 100 000. Son collègue Maxime Aubert l'utilise également pour dater les stalactites surplombant les ossements, qui affichent entre 58 000 et 80 000 ans.

La publication clôt environ six années d'études stratigraphiques et de datations. Un travail essentiel, affirme Laurent Bruxelles, qui effectue des reconstructions archéogéologiques similaires dans les grottes africaines : *« En croisant les méthodes de datation à partir de différents types de sédiments ou de vestiges, les chercheurs ont obtenu des résultats convergents. Ceci montre que l'histoire sédimentaire présentée ici est cohérente et confère une certaine fiabilité à la datation. »*.

NOMBREUSES DISPARITIONS SIMULTANÉES

Si cette nouvelle datation évacue l'épineuse question de la cohabitation éventuelle du Hobbit avec *Homo sapiens*, elle en soulève d'autres. La présence d'*Homo sapiens* est attestée dans la région, et notamment en Australie, dès 50 000 ans. L'homme de Neandertal et l'homme de Denisova étaient également présents en Asie. La disparition du petit Hobbit aurait-elle un lien avec l'arrivée de ces espèces humaines ? La question est d'autant plus pertinente qu'*Homo floresiensis* n'est pas le seul à avoir disparu vers 50 000 ans. La grotte de Liang Bua a livré les traces de la faune contemporaine du Hobbit : des vautours, un marabout géant, un stégodon – cousin de taille réduite de nos éléphants–, et même des dragons de Komodo. Or, eux aussi semblent avoir disparu à la même époque. Peut-on y voir un lien ? *« Il n'est pas impossible qu'*Homo sapiens *et* Homo floresiensis *se soient rencontrés,* indique Florent Détroit. *Cette rencontre a pu créer, plus ou moins directement, une rude compétition sur une petite île où l'on sait que les ressources sont limitées. »*

Les auteurs restent cependant prudents, comme le confirme Richard Roberts : *« Il faut garder en tête que nous n'avons pas de preuve de la présence d'humains modernes sur l'île de Florès il y a 50 000 ans. Les traces les plus récentes dont nous disposons commencent à - 11 000 ans. Certes, on sait que les humains étaient présents sur d'autres îles, et notamment en Australie, dès - 50 000 ans. Et en Australie, il y a beaucoup d'arguments pour dire qu'ils ont joué un rôle décisif dans l'extinction de la mégafaune endémique qui peuplait à cette époque le continent »*. Mais quant à savoir si la disparition d'*Homo floresiensis* est une autre conséquence de la dispersion de notre espèce… Le chercheur envisage sérieusement la possibilité mais conclut : *« Nous aurions besoin de preuves. »* ■

(1) T. Sutikna *et al., Nature,* doi:10.1038/nature.2016.19651, 2016.

(2) P. Brown *et al., Nature, 431,* 1055, 2004.

(*) L'apatite est un minéral composé de calcium et de phosphate.

Pour en savoir plus

■ A. Balzeau, « L'homme de Florès. Son crâne nous renseigne sur ses origines », *Archéologia, 542,* 30, 2016.

tinyurl.com/universcience-tv-flores Documentaire de 52 minutes de Laurent Orluc sur l'homme de Florès.

Le peuplement des îles au sud de l'Asie se précise

Il y a 50 000 ans, des populations d'*Homo sapiens,* ayant quitté l'Afrique plusieurs générations auparavant, parvenaient en Australie. Comment ? Un simple regard sur une carte de la région désigne le chemin le plus probable : ils devaient provenir du continent asiatique, en empruntant le chapelet des îles philippines et/ou indonésiennes. Le niveau de la mer était plus bas qu'aujourd'hui, et découvrait certains bras de mer, mais pas tous. Espèces humaines et animales ont dû parfois traverser des bras de mer de plus de 100 kilomètres sur des troncs d'arbre ou des radeaux de fortune. Mais, en cherchant des traces du passage d'*Homo Sapiens* dans ces îles, les paléontologues sont tombés sur des témoignages auxquels ils ne s'attendaient pas. Certes, ils ont trouvé des fossiles d'*Homo sapiens* dans les îles de Palawan et de Bornéo, datés d'il y a 47 000 ans et 42 000 ans. Mais en 2003, ils découvrent aussi sur l'île de Florès, au nord-ouest de l'Australie, une autre espèce du genre humain, *Homo floresiensis*. On sait désormais qu'elle y vécut entre 100 000 et 60 000 ans. En 2010, Florent Détroit (1), entouré d'une équipe philippine, datait, avec l'aide de Rainer Grün (auquel on doit aussi la datation des os d'*Homo floresiensis*), un fragment de pied humain (3e métatarse) mis au jour dans la grotte de Callao, sur l'île de Luçon (Philippines), au nord de l'île de Florès : 67 000 ans. Mais les traits de ces espèces asiatiques, notamment leur petite taille et leur gracilité, s'avèrent fort différents de ceux d'*Homo sapiens* ou de Neandertal, les deux principales espèces humaines connues pour cette époque.

Homo sapiens* ne fut donc pas le premier à coloniser cette région. Mais d'où venaient les pionniers ? *« La morphologie d'*Homo floresiensis *suggère qu'il descend d'un homininé ancien, qui aurait quitté l'Afrique bien avant que n'apparaissent les branches* Homo sapiens, Homo neandertalensis *ou celle de l'homme de Denisova »,* indique Florent Détroit. L'hypothèse la plus probable : *«* Homo floresiensis *descendrait d'*Homo erectus, *auteur probable des outils de pierre taillée datés d'environ 1 million d'années découverts sur un autre site à Florès. Celui-ci aurait évolué vers une forme naine, suivant un type d'évolution bien connu en paléontologie pour d'autres espèces isolées sur des îles aux ressources restreintes. »

(1) A. S. Mijares *et al. Journal of Human Evolution, 59,* 123, 2010.

CLIMAT

LA MONTÉE DES EAUX S'ACCÉLÈRE

Si les émissions de gaz à effet de serre gardent leur rythme actuel, l'élévation du niveau de la mer attribué à la fonte de l'Antarctique pourrait atteindre plus de 1 mètre en 2100 et plus de 13 mètres en 2500. Un niveau inquiétant, plus du double de ce qui avait été obtenu par les précédentes modélisations. Pour obtenir ce résultat, deux climatologues américains ont intégré à leur modèle de calotte glaciaire Antarctique des paramètres liés au réchauffement atmosphérique jusque-là sous-estimés : l'augmentation de l'eau de fonte et des précipitations à la surface de la glace. Ces deux paramètres augmenteraient la fragilité de la glace, ainsi que l'effondrement des falaises de glace en bord de mer. Avant d'appliquer leur modèle à différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre pour le futur, les chercheurs l'ont étalonné de manière à expliquer les niveaux marins du Pliocène (il y a environ 3 millions d'années) et du dernier Interglaciaire (entre 130 000 et 115 000 ans). Ces niveaux étaient de 6 à 9 mètres plus élevés qu'aujourd'hui, alors que les températures polaires n'étaient que légèrement supérieures. Le modèle indique aussi que le réchauffement de l'océan empêcherait la glace de se reformer pendant des milliers d'années.

R. DeConto et D. Pollard, *Nature, 531,* 591, 2016.

▲ *La fonte de l'Antarctique pourrait provoquer une hausse inquiétante du niveau de la mer.*

ASTROPHYSIQUE

VERS LA DÉTECTION DU FOND D'ONDES GRAVITATIONNELLES

Le 14 septembre 2015, la détection de l'onde gravitationnelle émise par la fusion de deux trous noirs a ouvert une nouvelle fenêtre sur l'Univers. Outre cet événement, baptisé GW150914, d'autres événements de fusion d'astres denses – trous noirs mais aussi étoiles à neutrons – sont attendus à mesure que les principaux instruments – les deux interféromètres de Ligo aux États-Unis et celui de Virgo, en Italie – enregistreront des données. La fusion continue de tous ces astres dans l'Univers crée un faible « fond » d'ondes gravitationnelles qui parvient sur la Terre en provenance de toutes les directions du cosmos. Sera-t-il jamais détectable ? Oui, si l'on en croit l'analyse détaillée de l'événement GW150914 qui permet maintenant d'estimer son amplitude. Ce fond est dix fois plus fort que ce qu'on estimait auparavant et devrait ainsi être décelable d'ici quelques années, grâce à l'accroissement de la sensibilité des instruments.

Collaboration Ligo/Virgo, *Phys. Rev. Lett., 116,* 131102, 2016.

BIOLOGIE

LE PLUS PETIT GÉNOME ARTIFICIEL

Nouvelle prouesse génétique de l'équipe de Craig Venter. En 2010, au sein de son institut en Californie, elle avait réussi à produire un génome artificiel qui s'inspirait de celui de la bactérie *Mycoplasma mycoides*. Aujourd'hui, elle est parvenue à simplifier au strict minimum ce génome artificiel en divisant son nombre de paires de bases par deux. Il n'en comprend que 531 000, correspondant à 473 gènes. Un record puisque le plus petit génome d'une bactérie autonome compte 580 000 paires de bases. Introduit dans l'enveloppe d'une bactérie sans génome, il a formé un organisme artificiel capable de se diviser toutes les 180 minutes.

C. Hutchison III *et al., Science,* doi:10.1126/science.aad6253, 2016.

ÉTHOLOGIE

LE CHANT SYNTAXIQUE DE LA MÉSANGE

À l'instar de l'homme, les mésanges de Chine maîtriseraient la syntaxe. Une équipe internationale a montré que, face au danger, ces oiseaux combinent divers sons, regroupés en 4 types distincts : A, B, C et D. Ils produisent ainsi deux sortes de chant : ABC et D. Les chercheurs ont diffusé par haut-parleur plusieurs combinaisons de ces chants. Lorsqu'ils entendent ABC, les volatiles regardent autour d'eux pour repérer le danger. Lorsque le chant D est diffusé, ils se rassemblent autour du haut-parleur. Et l'association ABC-D provoque les deux réactions. Surtout, ils ne réagissent pas si les mêmes sons sont émis dans un ordre inversé. Ce qui tend à prouver l'importance de la syntaxe chez les mésanges.

T. N. Suzuki *et al., Nature Communications,* doi:10.1038/ncomms10986, 2016.

▲ *La mésange de Chine combine les sons pour communiquer.*

KNUT CHRISTIANSON - ALPSDAKE

“LA PROBABILITÉ QUE LE LÂCHER DU MOUSTIQUE *AEDES AEGYPTI* AIT DES EFFETS NÉGATIFS SUR L’ENVIRONNEMENT EST NÉGLIGEABLE.”

AGENCE AMÉRICAINE DES MÉDICAMENTS, sur le lâcher de moustiques OGM pour lutter contre le virus Zika, mars 2016.

SANTÉ

Patient zéro

L’analyse d’anciens échantillons sanguins a permis de reconstituer l’arbre phylogénétique du virus du sida. Ainsi, le stewart canadien Gaëtan Dugas n’est pas le « patient zéro ». L’épidémie aurait commencé autour des années 1970, sans que l’on puisse préciser où.

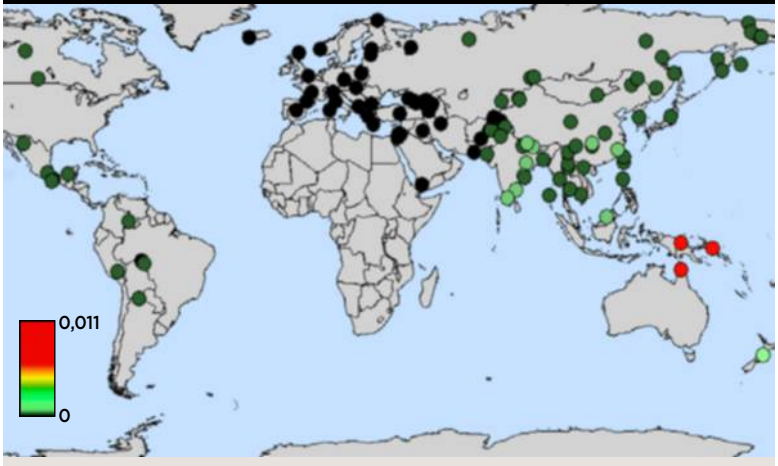
J. Cohen, *Science, 351,* 1013, 2016.

13,4

MILLIARDS D’ANNÉES. C’est l’âge de la galaxie GN-z11, la plus lointaine et plus ancienne galaxie jamais observée. L’Univers n’avait alors que 400 millions d’années.

P. Oesch *et al., The Astrophysical Journal, 819,* 129, 2016.

Les descendants des Dénisoviens sont océaniens



UCLA/HARVARD

▲ Réalisée grâce à l’analyse du génome de 120 populations actuelles, cette carte représente par des points de couleur la quantité d’ADN héritée de l’homme de Denisova, un ancêtre du genre *Homo.* Le noir correspond à la proportion la plus faible et le rouge à la plus élevée. Cette analyse révèle que les populations d’Asie du Sud possèdent davantage de génome dénisovien qu’on ne le pensait auparavant. En outre, elle suggère que le croisement entre les deux espèces s’est produit 100 générations après l’hybridation entre l’homme moderne et Neandertal.

S. Sankararaman *et al., Current Biology, 26,* 1, 2016.

CHIMIE

UNE BRIQUE DE LA VIE DANS LES COMÈTES ?

Le ribose, sucre à la base du matériel génétique des êtres vivants, a pu se former dans les glaces cométaires. C’est ce que des équipes internationales ont conclu après avoir analysé une comète artificielle. Reste que ce composé indispensable à la vie n’a jamais été observé ni dans les météorites ni dans les comètes.

C. Meinert *et al., Science,* doi: 10.1126/science.aad8137, 2016.

“Le premier défi a consisté à transformer 11,5 millions de documents non structurés en quelque chose d’intelligible pour les journalistes.”

Sébastien Heymann, cofondateur de la société Linkurious, qui a participé à la mise en forme des données des « Panama Papers ».

PHYSIQUE

Le record d’un photon

Des physiciens sont parvenus à garder un photon pendant 2,5 millisecondes dans un microrésonateur, une minuscule sphère de verre. C’est 25 fois mieux que le précédent record. Pour cela, ils ont « dopé » le microrésonateur avec des ions d’erbium, ce qui ralentit la propagation de la lumière et donc prolonge la vie des photons.

V.Huel *et al., Phys. Rev. Lett., 116,* 133902, 2016.

Récupérer l'eau en imitant la nature

Un nouveau matériau vient de voir le jour. Il est capable d'optimiser la condensation de la vapeur d'eau et la récupération des gouttes déposées à sa surface.

Les scarabées du désert de Namibie doivent leur survie aux petites bosses qui tapissent leur carapace. En condensant la vapeur d'eau de l'atmosphère, ces reliefs jouent le rôle de systèmes de récupération d'eau. Les épines des cactus assurent, quant à elles, le transport vers la plante des gouttes d'eau se formant à leur pointe. Tandis que les plantes carnivores en forme de cruche du genre Nepenthes sont recouvertes d'un revêtement lubrifiant particulièrement glissant qui précipite vers les sucs digestifs les insectes qui ont le malheur de s'y poser.

Trois stratégies qu'une équipe de l'université Harvard, aux États-Unis, a combinées pour fabriquer un nouveau matériau « biomimétique » capable d'optimiser la condensation de la vapeur d'eau de l'atmosphère et la collecte des gouttes d'eau formées à sa surface (1).

Leur étude s'est d'abord portée sur les bosses de la carapace des scarabées du désert de Namibie. Longtemps, les scientifiques ont pensé que leur capacité à condenser la vapeur d'eau tenait au caractère hydrophile de leur surface. Mais, en 2010, des travaux ont montré qu'à l'inverse, celle-ci était recouverte d'une cire hydrophobe tout comme le reste de la carapace (2). Ce qui a conduit l'équipe de Harvard à émettre l'hypothèse que la géométrie des bosses suffit à optimiser la condensation. Pour vérifier leur hypothèse, les chercheurs ont fabriqué par impression 3D une surface de quelques millimètres de côté constituée d'une fine couche d'aluminium qui reproduit les bosses de l'insecte. Ils ont alors observé que le diamètre des gouttes formées à leur sommet est supérieur à celui des gouttes condensées sur les zones planes de la même surface. En augmentant la courbure des bosses, ils sont parvenus à former des gouttes plus grosses encore et qui grandissent plus rapidement. *« Ce qui offre un nouveau mécanisme de compréhension du captage de l'eau par ces scarabées »*, explique Laurent Courbin, de l'Institut de physique de l'université de Rennes-I.

REVÊTEMENT GLISSANT

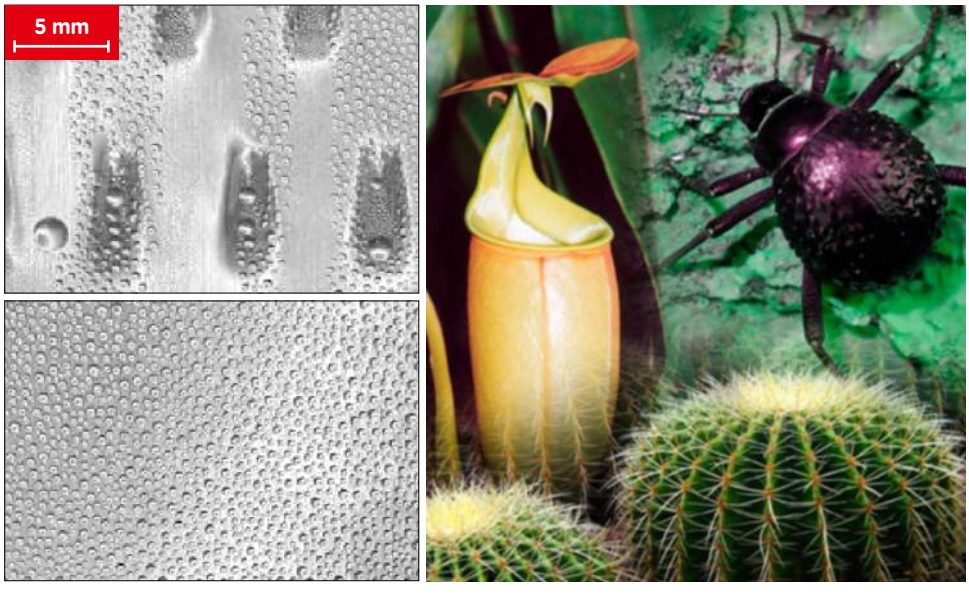
Pour optimiser la collecte de ces gouttes, les physiciens ont modifié la géométrie de l'un des côtés des bosses de manière à former une pente « asymétrique » qui, comme dans le cas des épines de cactus, s'élargit vers sa base. Après une série de traitements chimiques et thermiques, l'ensemble a été recouvert d'un revêtement glissant imitant celui des Nepenthes et permettant aux gouttes de dévaler la pente sans s'y accrocher. Sur leur chemin, elles rencontrent les gouttes plus fines qui s'y sont formées et grossissent ainsi en fusionnant.

« En moins d'une heure, on récupère ainsi un volume d'eau environ dix fois supérieur qu'avec les surfaces planes précédemment fabriquées en laboratoire! pointe Laurent Courbin. *Une avancée intéressante notamment pour le développement de récupérateurs de brume installés dans les régions où les pluies sont rares, comme en Amérique du Sud. De tels collecteurs permettraient de récupérer un maximum d'eau en un minimum de temps.* »

Oriane Dioux

(1) K.C. Park *et al.*, *Nature*, *531*, 2016.

(2) T. Nørgaard *et al.*, *Front Zool*, *7*, 23, 2010.



Le matériau (en haut à gauche) s'inspire du scarabée, du cactus et de la plante carnivore. Ainsi, la présence de bosses asymétriques et glissantes décuple le volume d'eau collecté par rapport à une surface plane (en bas).

KYOO-CHUL PARK AND JOANNA AIZENBERG - JAMES C. WEAVER AND JOANNA AIZENBERG

«Les recherches d'un vaccin thérapeutique contre le sida sont encore en phase exploratoire»

La recherche sur le développement d'un vaccin thérapeutique contre le virus du sida a progressé. Mais il est encore impossible d'envisager une disponibilité pour le grand public dans les prochaines années.

La Recherche Il y a quelques semaines, la start-up Biosantech a annoncé un vaccin efficace contre le sida, annonce rapidement mise en doute par la communauté scientifique. Où en est aujourd'hui la recherche sur le développement d'un tel vaccin?

Jean-Daniel Lelièvre Une dizaine d'essais de phase II sont en cours aux États-Unis, en Europe et notamment en France. Cela signifie que l'on en est à tester l'efficacité des vaccins sur un nombre limité de personnes infectées par le VIH qui arrêtent leur traitement durant l'essai. Il existe deux finalités dans ce type de recherche. La première, qui est la plus ancienne, est de fabriquer un vaccin qui diminue la charge virale, c'est-à-dire le nombre de virus dans le sang, et empêche la réplication du virus. Cela permettrait ainsi d'arrêter la prise de traitements antirétroviraux. La seconde est une stratégie d'éradication du virus présent dans le corps. Mais on est encore très loin de parvenir à éliminer totalement le virus, c'est pourquoi les recherches s'orientent davantage vers la première approche. La plupart des stratégies élaborées en ce sens visent à stimuler la réponse immunitaire qui est affaiblie au cours de l'infection et mise au repos avec la prise du traitement antirétroviral.

Avec quels résultats?

Pour certains vaccins, on observe une diminution de la charge virale, sans pour autant arriver à ce que le virus soit indétectable dans l'organisme (1,2). Il subsiste des virus qui continuent de se répliquer. Les personnes chez qui on observe cette diminution peuvent arrêter leur traitement, mais on sait que cela ne dure qu'un temps. Pour que la maladie n'évolue pas, il est nécessaire que la réplication du virus soit stoppée.

Peut-on espérer obtenir un vaccin dans les prochaines années?

Pour passer à des essais de phase III et ainsi tester l'efficacité d'un vaccin à plus grande échelle, il reste à trouver une molécule qui stoppe la réplication du VIH. Ce qui montrerait que le vaccin est au moins aussi efficace que les antirétroviraux qui, eux, parviennent à la stopper. Les recherches d'un vaccin thérapeutique contre le VIH sont encore en phase exploratoire. Même si on obtenait des résultats très convaincants dans les mois à venir, il faudrait encore de nombreuses années avant d'avoir un vaccin disponible pour le grand public. On obtiendra probablement des résultats intéressants et plus rapides si on se concentre sur les patients qui ont été traités dès la phase très précoce de leur infection. En effet, le réservoir du virus (*), responsable de la reprise de sa réplication, est plus faible chez ces patients. Les connaissances ont beaucoup évolué sur la réponse immunitaire contre le virus et sur les réservoirs viraux. Mais aucun résultat probant ne permet à l'heure actuelle d'envisager une modification de la prise en charge thérapeutique des patients infectés par le VIH incluant des stratégies vaccinales.

> **«UN VACCIN QUI DIMINUE LA CHARGE VIRALE PERMETTRAIT D'ARRÊTER LA PRISE DE TRAITEMENTS ANTIRÉTROVIRAUX»**

Propos recueillis par Oriane Dioux

(1) F. García *et al.*, *Science Translational Medicine*, 5, 166, 2013.
(2) Y. Lévy *et al.*, *European Journal of Immunology, 44 (9), 2802*, 2014.

▲ *Jean-Daniel Lelièvre, chercheur en immunologie*

DATES CLÉS

DEPUIS 2010
Responsable du département clinique de l'Institut de recherche vaccinale, membre du conseil scientifique du Sidaction.
DEPUIS 2014
Chef du service d'immunologie clinique et maladies infectieuses du CHU Henri-Mondor de Créteil.

(*) Le réservoir du virus est l'ensemble des cellules qui contiennent l'ADN du VIH et ne le lisent plus pour produire du virus, mais peuvent le produire de nouveau un jour.

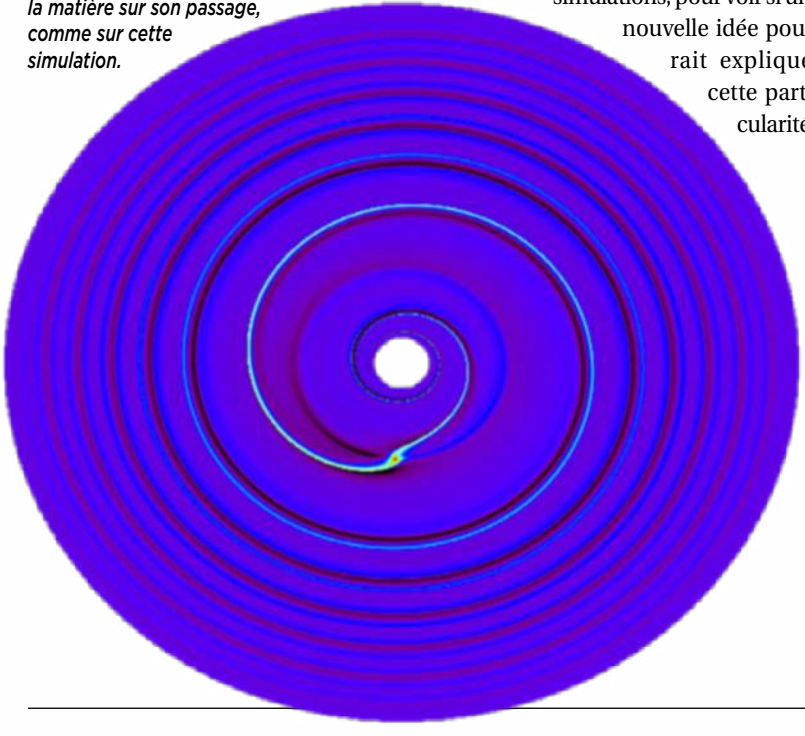
DR

Le Système solaire interne vidé par Jupiter

Un nouveau scénario de formation de la planète géante Jupiter permet de lever le voile sur une particularité de notre Système solaire.

(*) L'unité astronomique est la distance moyenne de la Terre au Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres.

Pourquoi n'y a-t-il pas de planète très près du Soleil, contrairement à ce qui se passe sur la plupart des autres systèmes planétaires connus ? C'est en se posant cette question que Sean Raymond, astronome au laboratoire d'astrophysique de Bordeaux, et ses collègues ont proposé un nouveau modèle du Système solaire primitif. Leur idée est que Jupiter a commencé à se former très près du Soleil puis s'en est éloigné en repoussant la matière sur son passage. C'est cet effet « pelleteuse » qui aurait vidé les alentours du Soleil (1), laissant la petite planète Mercure à 0,4 unité astronomique (UA) (*) et Vénus à 0,7 UA. *« À l'inverse, dans les autres systèmes planétaires, il y a très souvent des planètes de la taille de la Terre ou plus grandes, bien plus proches de leur étoile »*, s'étonne Sean Raymond. Bien décidé à percer le mystère, l'astronome commence à rassembler des éléments épars, des mécanismes physiques connus, et à faire des simulations, pour voir si une nouvelle idée pourrait expliquer cette particularité.



En se formant près du Soleil (au centre), le cœur rocheux de Jupiter interagit avec le disque de gaz et s'éloigne en repoussant la matière sur son passage, comme sur cette simulation.

Première partie du scénario : de petits cailloux de la taille de grains de sable ou de gravier (des *« pebbles »*) interagissent avec le disque de gaz qui entoure alors le Soleil et tombent vers cet astre. Les astronomes font l'hypothèse que tous ces cailloux se regroupent au bord interne du disque proto-planétaire et s'agglomèrent. Un objet de plusieurs fois la masse terrestre se forme alors tout près du Soleil (vers 0,1 UA). *« Cet objet peut être considéré comme le cœur rocheux de Jupiter,* explique Sean Raymond, *mais il n'est pas à la bonne place ! Comme Jupiter aujourd'hui n'est pas proche du Soleil, il faut trouver comment il a pu migrer vers sa position actuelle. »*

MIGRATION PLANÉTAIRE

D'où la seconde partie du scénario : la migration planétaire. Placées dans un disque de gaz et de poussière, les planètes peuvent soit s'éloigner, soit s'approcher du Soleil. Ici, les astronomes ont montré que le cœur rocheux à l'origine de Jupiter a migré vers l'extérieur, s'éloignant lentement du Soleil jusqu'à sa position actuelle. Il a repoussé la matière qu'il rencontrait, en raison de « résonances orbitales ». *« Or cet effet de pelleteuse devient de moins en moins efficace à mesure que l'on s'éloigne du Soleil, et vers l'orbite de Mercure ou de Vénus, les objets ne sont plus repoussés »*, conclut Sean Raymond.

« Jusqu'alors, tous les modèles supposaient que Jupiter s'est formé à au moins 3 UA du Soleil. Ce scénario est donc original, mais il a l'air de fonctionner du point de vue de la migration », commente Aurélien Crida, astronome à l'observatoire de la Côte d'Azur. Cerise sur le gâteau, ce scénario expliquerait aussi la formation du noyau de Saturne, qui apparaît dans ces simulations. Une idée à creuser. **Philippe Pajot**

(1) S. Raymond *et al.*, *MNRAS*, doi:10.1093/mnras/stw431, 2016.

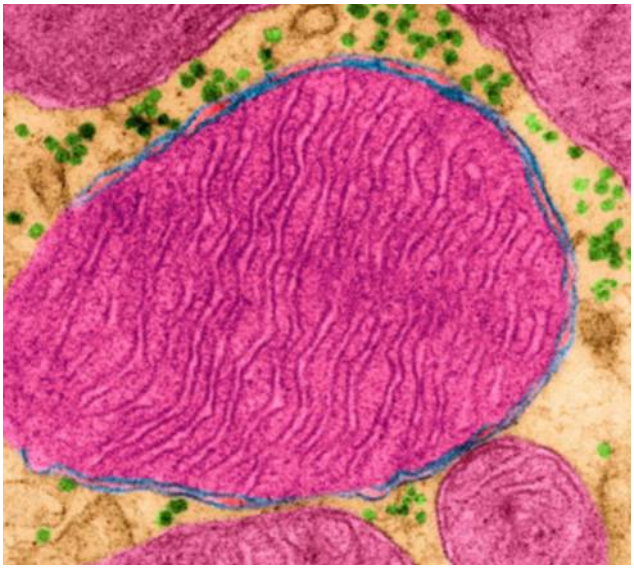
ARNAUD PIERENS/LAB/UNIVERSITE DE BORDEAUX

Pourquoi les mitochondries ont perdu une partie de leur ADN

Une nouvelle méthode statistique a permis de reconstruire l'histoire du génome mitochondrial et de montrer que les gènes conservés dans cet organite ont des caractéristiques bien précises.

Le noyau n'est pas le seul élément cellulaire à contenir de l'ADN. Les mitochondries, les usines énergétiques de la cellule, en possèdent aussi, en quantité bien moindre. Chez l'homme, l'ADN mitochondrial ne compte ainsi que 13 gènes (contre 20 000 environ dans le noyau), celui de certains organismes unicellulaires 60 et celui du parasite responsable de la malaria n'en possède que 3.

Les mitochondries, pourtant, n'ont pas toujours été aussi pauvres en gènes. Il s'agissait au départ de bactéries qui ont construit un lien stable avec une autre cellule, donnant naissance aux cellules à noyau, appelées cellules eucaryotes. Et l'on estime à quelques milliers le nombre de gènes qu'elles contenaient. La grande majorité de leur ADN a depuis été transférée dans le noyau cellulaire. Pour quelle raison? Et pourquoi les mitochondries ont-elles tout de même conservé quelques gènes?



▲ *Eléments essentiels de la cellule, les mitochondries (en rose) participent notamment à sa respiration. Leur ADN est vraiment spécifique et il contient beaucoup moins de gènes que celui du noyau.*

DENNIS KUNKEL MICROSCOPY, INC./PHOTOTAKE/LOOKATSCIENCES

ALGORITHME D'ANALYSE

Pour étudier l'histoire de cette perte et déterminer par le calcul quelles contraintes l'ont dirigée, Iain Johnston et Ben Williams, respectivement mathématicien et biologiste de l'université de Birmingham, ont mis au point une méthode statistique (1). *« C'est la première fois qu'une étude cherche à déterminer, à partir de l'ensemble des génomes mitochondriaux connus, les raisons pour lesquelles certains gènes ont été perdus ou gagnés au cours de l'évolution »*, note André Dietrich, de l'Institut de biologie moléculaire des plantes de Strasbourg.

Les auteurs ont travaillé à partir des génomes mitochondriaux complets de 2015 espèces différentes et pour lesquels les gènes fonctionnels ont été identifiés. Ils ont élaboré un algorithme permettant d'analyser les différentes combinaisons de gènes trouvées au sein de ces génomes. En reliant la nature des gènes perdus et les relations de parenté des espèces analysées, ils ont ainsi pu construire un modèle d'évolution du génome mitochondrial. Et observé que le profil d'évolution mis en évidence ne peut pas s'expliquer par le seul hasard: la perte de gènes semble obéir à un scénario spécifique marqué par différentes phases. Certains gènes sont perdus en premier, d'autres sont au contraire souvent retenus dans le génome.

GÈNES RESCAPÉS

Trois facteurs principaux, a priori indépendants, favorisent ainsi la rétention d'un gène dans la mitochondrie: le fait de coder des protéines hydrophobes, de contenir davantage de combinaison des nucléotides G et C que les autres gènes (une combinaison chimiquement plus stable) et enfin de coder des protéines constituant le cœur des assemblages macromoléculaires producteurs d'énergie dans l'organite. Les gènes répondant à ces caractéristiques paraissent mieux protégés et moins susceptibles de disparaître du génome mitochondrial.

Au-delà de ces résultats, l'algorithme mis au point offre un outil de prédiction, applicable à tout changement discontinu s'établissant de façon irréversible avec le temps. Il pourrait en outre permettre d'étudier des questions aussi variées que l'évolution des chloroplastes – l'équivalent des mitochondries pour les végétaux–, la progression des cancers ou encore la paléontologie. **Laurence Denis**

(1) I. G. Johnston, B.P. Williams, *Cell system*, 2, 2, 2016.

L'algorithme de Shor progresse

Des physiciens viennent de faire fonctionner un algorithme quantique qui pourrait briser les meilleurs systèmes de cryptographie actuels, le jour où les ordinateurs quantiques seront assez performants pour cela.

15

C'EST LE NOMBRE qui a été factorisé à l'aide de l'algorithme quantique.

Un ordinateur quantique réalisé par des physiciens du MIT et de l'université d'Innsbruck, en Autriche, a réussi à factoriser le nombre 15 grâce à un algorithme quantique, l'algorithme de Shor (1). Ce n'est ni une première ni un record, mais une belle avancée puisque les précédentes réalisations utilisaient la connaissance a priori du résultat pour mettre en place des raccourcis expérimentaux. La méthode employée ici pourrait être appliquée à de plus grands nombres entiers.

Le résultat, $15 = 3 \times 5$, peut sembler trivial. Pourtant, la décomposition d'un nombre en un produit de facteurs premiers (ici, 3 et 5) est primordiale pour le système de cryptographie RSA, utilisé dans la plupart des transactions sécurisées sur Internet, par exemple. Trouver l'unique décomposition d'un nombre en facteurs premiers se révèle très difficile dès que le nombre est grand. Le plus grand nombre ayant été factorisé à l'heure actuelle possède 232 chiffres, et a requis deux ans de calcul sur des milliers d'ordinateurs, l'équivalent de 2 000 années de calcul sur un seul ordinateur (2). Et les systèmes de chiffrement actuels utilisent des nombres de longueur encore plus importante.

En 1994, l'informaticien Peter Shor a montré qu'un ordinateur quantique pourrait réaliser ces calculs de manière bien plus rapide (3). Cette découverte a intéressé de nombreux acteurs, en particulier les militaires. Le principe consiste à reformuler le questionnement mathématique sous forme de recherche de la périodicité d'une fonction, un problème résolu très efficacement grâce à l'algorithme quantique. On remonte ensuite aux facteurs premiers à l'aide de l'arithmétique classique. Dès 2001, les chercheurs réussissaient à factoriser le nombre 15 avec l'algorithme de Shor. Le nombre 21 a suivi en 2012. *«Mais des ruses expérimentales étaient utilisées pour réduire la complexité du problème, ce qui atténue la portée de la méthode»,* pointe Thomas Monz, premier auteur de l'article récemment publié dans *Science*. Avec ses collègues, il a piégé et contrôlé individuellement des ions de calcium à l'aide de lasers afin de coder des bits quantiques. La manipulation de l'état de ces ions permet de réaliser les portes logiques, c'est-à-dire les opérations basiques qui forment l'algorithme. *«Ils ont réalisé la version de Kitaev de l'algorithme de Shor,* explique Sébastien Tanzilli, physicien au Laboratoire de physique de la matière condensée à Nice. *Ils ont employé 5 bits quantiques effectifs plus 4 autres de type "cache", qui permettent d'accélérer les calculs par anticipation.»* La physique quantique étant affaire de probabilités, l'algorithme ne donne pas la bonne réponse à tous les coups, mais après huit exécutions consécutives, le niveau de confiance dans le résultat dépasse 99 %. *«L'implémentation est fine, astucieuse et la méthode de calcul est en principe applicable pour factoriser des nombres plus grands,* poursuit Sébastien Tanzilli. *Mais en terme expérimental, aller plus loin restera ardu. Piéger et manipuler des ions nécessite en effet plusieurs lasers de contrôle. Doubler le nombre de bits quantiques représenterait donc déjà une prouesse expérimentale.» «Nous progressons par étapes,* détaille Thomas Monz. *En ce moment, nous améliorons nos portes logiques pour les rendre résilientes face aux erreurs.»*

APRÈS HUIT EXÉCUTIONS CONSÉCUTIVES, LE NIVEAU DE CONFIANCE DANS LE RÉSULTAT DÉPASSE 99 %

Sylvain Guilbaud

(1) T. Monz *et al., Science, 351,* 1068, 2016.

(2) Th. Kleinjung *et al., IACR,* 2010 (eprint.iacr.org/2010/006.pdf)

(3) P. W. Shor, *in Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science,* 124, 1994.

ABONNEZ-VOUS À La Recherche

Et recevez EN CADEAU ces 2 numéros

Dans le monde entier, des doctrines religieuses défendent l'idée qu'une puissance divine est à l'origine de l'Univers, et, de fait, de l'espèce humaine. Créationnisme, dessein intelligent ? Quel que soit le nom qu'elles affichent, elles tentent de se hisser au rang de théories scientifiques. La science a mis, depuis Galilée et Descartes, quatre siècles pour devenir autonome vis-à-vis de ces doctrines.

Les dossiers de
La Recherche
Les origines de la vie
La quête des premiers organismes
La découverte des plus anciens fossiles
La création de bactéries artificielles
Les nanomédicaments

A quoi ressemblaient nos premiers ancêtres ? Comment ont-ils émergé et se sont-ils développés sur la Terre primitive ? C'est en conjuguant des recherches que les scientifiques convergent vers une meilleure compréhension des origines de la vie.

10 nos + 1 n° double | **60€ seulement** au lieu de ~~71,90€~~

ou 5€ par mois

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner sous enveloppe affranchie à La Recherche - Service Abonnements - 4, rue de Mouchy - 60438 Noailles cedex

OUI, je m'abonne à **La Recherche** et je reçois **EN CADEAU** les 2 numéros : Dieu et la science (D52) + Les origines de la vie (D53).

☐ **1 AN - 10 nos + 1 n° double + 4 hors-série La Recherche** pour **84 €** au lieu de ~~99,50 €~~ ou **7 €/mois**(*).

Je préfère l'abonnement au mensuel seul :

☐ **1 AN - 10 nos + 1 n° double** pour **60 €** au lieu de ~~71,90 €~~ ou **5 €/mois**(*).

MES COORDONNÉES

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

_____

Code postal : _____ Ville : _____

Téléphone portable : _____

Pour recevoir plus rapidement les informations relatives à votre abonnement, merci d'indiquer votre e-mail : _____

MON MODE DE RÉGLEMENT

☐ Je règle en une seule fois :

☐ **84 €** au lieu de ~~99,50 €~~ ☐ **60 €** au lieu de ~~71,90 €~~.

Je règle par :

☐ Chèque bancaire à l'ordre de La Recherche ☐ Carte bancaire

N° _____

Expire fin _____

Je note les 3 derniers chiffres du numéro inscrit dans la zone signature, au dos de ma carte _____

Signature obligatoire

☐ Je règle par prélèvement : ☐ **7 €**/ mois(*) ☐ **5 €**/ mois(*).

Je remplis le mandat de prélèvement SEPA ci-contre.

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT **SEPA**

PLRC511

En signant ce formulaire de mandat, vous autorisez La Recherche à envoyer des instructions à votre banque pour débiter votre compte. Vous autorisez également votre banque à débiter votre compte conformément aux instructions de La Recherche. Vous bénéficiez du droit d'être remboursé par votre banque selon les modalités décrites dans la convention que vous avez passée avec elle. Toute demande de remboursement doit être présentée dans les 8 semaines suivant la date de débit de votre compte. Vos droits concernant ce mandat sont expliqués dans une notice disponible auprès de votre banque. Il s'agit d'un prélèvement récurrent : le premier prélèvement sera effectué après l'enregistrement de votre abonnement.

Créancier

Sophia Publications - LA RECHERCHE
8, rue d'Aboukir - 75002 Paris

Identification du créancier

FR48ZZZ440981

Inscrivez VOS COORDONNÉES (merci d'écrire en majuscules)

Nom .....

Prénom .....

Adresse .....

.....

Code Postal _____ Ville .....

Indiquez LES COORDONNÉES DE VOTRE COMPTE (disponibles sur votre R.I.B.)

IBAN - Numéro d'identification international du compte bancaire

_____

BIC - Code international d'identification de votre banque

_____

N'oubliez pas de joindre un Relevé d'Identité Bancaire (R.I.B.).

À ..... Le ...../...../.....

Signature obligatoire

Sophia Publications - SA au capital de 9 115 568 € - 562 029 223 RCS Paris
Service abonnements : ✆ France : 01 55 56 71 15 - ✆ Etranger : 00 33 155 56 71 15
E-mail : abo.recherche@groupe-gli.com

La Recherche

(*) Pour un minimum de 12 prélèvements. Au terme des 12 mois votre abonnement se poursuivra au même tarif préférentiel, et pourra être interrompu à tout moment par simple courrier.
Je peux acquérir séparément les numéros normaux au prix de 6€40 et le numéro double au prix de 7€90. Offre réservée aux nouveaux abonnés résidant en France métropolitaine jusqu'au 31/06/2016 et dans la limite des stocks disponibles.
Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès, rectification et de suppression des informations vous concernant. Elles sont destinées exclusivement à SOPHIA PUBLICATIONS et à ses partenaires sauf opposition de votre part en cochant la case ci-après ☐.

Le voile se lève sur les particules les plus énergétiques de l'Univers

Découverts il y a plus d'un siècle, les rayons cosmiques restent très mystérieux. Deux observations indirectes révèlent que certains d'entre eux proviendraient des environs du trou noir situé au centre de notre galaxie.

D'où proviennent les rayonnements cosmiques, ces particules chargées dont la vitesse est proche de celle de la lumière, et qui arrosent la Terre ? Un siècle après leur découverte, on en sait un peu plus grâce à deux collaborations internationales : le télescope Hess (High Energy Stereoscopic System), installé en Namibie, a localisé une source tout près du trou noir supermassif situé au centre de notre galaxie (1), tandis que les antennes du réseau de radiotélescopes Lofar (Low Frequency Array) – installées en Europe – ont observé des particules plus énergétiques encore dans notre galaxie sans que leur origine précise ait pu être déterminée (2).

« *Nous montrons ainsi qu'il existe une source de rayonnement cosmique de haute énergie tout près du centre de notre galaxie,* se réjouit le Français Mathieu de Naurois, du CNRS, directeur de l'expérience Hess. Cette région est complexe, mais nous avons de bonnes raisons de penser que c'est le trou noir supermassif au centre de notre galaxie qui est la source de ce rayonnement. »

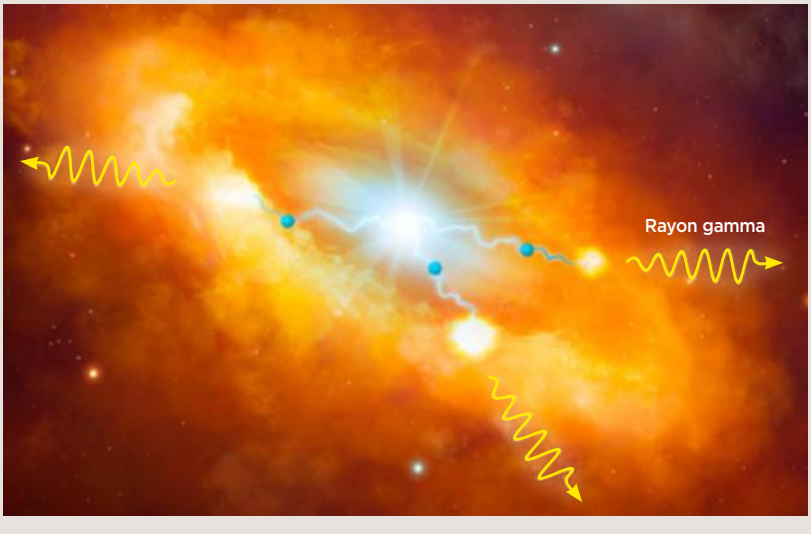
DES MILLIERS D'ANTENNES RADIO

C'est là que des particules – probablement des protons – seraient accélérées à des énergies atteignant le pétaélectronvolt (PeV ou 10^{15} eV). Un rayonnement qui possède une énergie cent fois supérieure à ce que les physiciens savent reproduire sur Terre avec le Grand Collisionneur de hadrons (LHC) installé au Cern, près de Genève. « *Avec les cinq télescopes Hess installés en Namibie, on observe que la source est proche du centre de la galaxie.* »

Si l'existence de ces particules très énergétiques était connue, l'origine de leur énergie restait mystérieuse. « *Il peut s'agir des restes d'une supernova – une étoile qui a explosé –, mais aussi d'un trou noir massif, ou encore de ce qu'on appelle les superbulles, des régions très chaudes formées dans le milieu interstellaire par les restes d'explosions simultanées d'étoiles massives, les supernovae.* » Mais compte tenu des caractéristiques du rayonnement observé par Hess pendant une dizaine d'années, les scientifiques pensent qu'un trou noir supermassif est la cause la plus probable. « *Ces observations correspondent à une source capable d'accélérer les particules pendant mille à dix mille ans, un temps incompatible avec la durée d'activité des restes de supernova. Et pour le moment, rien ne permet d'affirmer que les superbulles sont capables de créer des énergies de l'ordre du pétaélectronvolt* », conclut Mathieu de Naurois.

À 8 400 kilomètres des télescopes Hess, des milliers d'antennes radio ont été installées dans 50 stations d'observation en Europe, dont le cœur – 38 stations – se trouve aux Pays-Bas. Ce réseau, baptisé Lofar, a révélé des rayons cosmiques encore plus énergétiques. Lofar capte des signaux radio de fréquence comprise entre 10 et 250 mégahertz (MHz) avec des milliers de petits fils électriques d'un mètre de long environ analogues aux antennes qu'on utilise pour écouter la radio FM. « *Les stations du réseau Lofar n'écoutent pas la bande 90-110 MHz car les ondes que l'on étudie sont des millions de fois moins puissantes que celles*

▼ **Sur cette vue d'artiste de notre galaxie, les rayons cosmiques issus du voisinage du trou noir central interagissent avec les nuages moléculaires entourant le centre galactique. Cette interaction produit les rayons gamma qui seront ensuite détectés.**



MARK A. GARLICK / SPACE-ART.CO.UK

▲ *Le réseau de radiotélescopes Lofar combine le signal de plusieurs stations comme celle-ci, aux Pays-Bas, pour reconstruire les émissions radio du ciel. Certaines de ces émissions ont permis de mettre en évidence des rayons cosmiques de haute énergie.*

émises par les stations FM, précise Jean-Mathias Griessmeier, de la station de radioastronomie de Nançay. *Lofar a été conçu pour toutes sortes d'observations, notamment pour capter les ondes radio de l'Univers primitif, mais il est apparu très vite qu'il permettrait aussi d'étudier les particules cosmiques de manière indirecte »* (lire ci-dessous).

Cette collaboration internationale annonce qu'il existe, dans notre galaxie, une source de rayonnements cosmiques dont l'énergie atteint 100 PeV, cent fois plus que ceux repérés par l'équipe Hess. *« Quand ils pénètrent dans l'atmosphère terrestre, les rayons cosmiques créent des gerbes de particules qui interagissent à leur tour avec la matière en créant des ondes radio. En mesurant leur intensité et le décalage dans le temps des signaux reçus par les différentes antennes, on peut déterminer la nature des rayons cosmiques et évaluer leur direction d'origine. »* Les observations à très haute énergie du Lofar (entre 10^{17} et $10^{17,5}$ eV) pointent la présence de noyaux lourds (azote et fer), caractéristiques d'une origine proche, dans notre galaxie. Mais la forte proportion (80 %) de noyaux légers (hydrogène et hélium) également mise en évidence dans les données est inattendue, car les chercheurs pensaient jusque-là que des particules légères à de telles énergies ne peuvent provenir que de galaxies lointaines. Rien ne permet, pour l'instant, de trancher sur l'origine intra ou extra-galactique de ce flux même si, selon eux, la source est plus probablement située dans la Voie lactée. *« Il faudra bien plus de mesures pour cela. Par chance, les observations de rayons cosmiques peuvent être faites en parallèle à d'autres expériences, sans monopoliser l'instrument et le Lofar va bientôt se doter d'un second cœur – un réseau dense d'antennes. »* Baptisé NenuFAR, il est en cours de construction à Nançay. *« C'est un ensemble de 96 récepteurs de 19 antennes chacun qui permettra d'améliorer la sensibilité de nos mesures »*, se réjouit Jean-Mathias Griessmeier.

Denis Delbecq

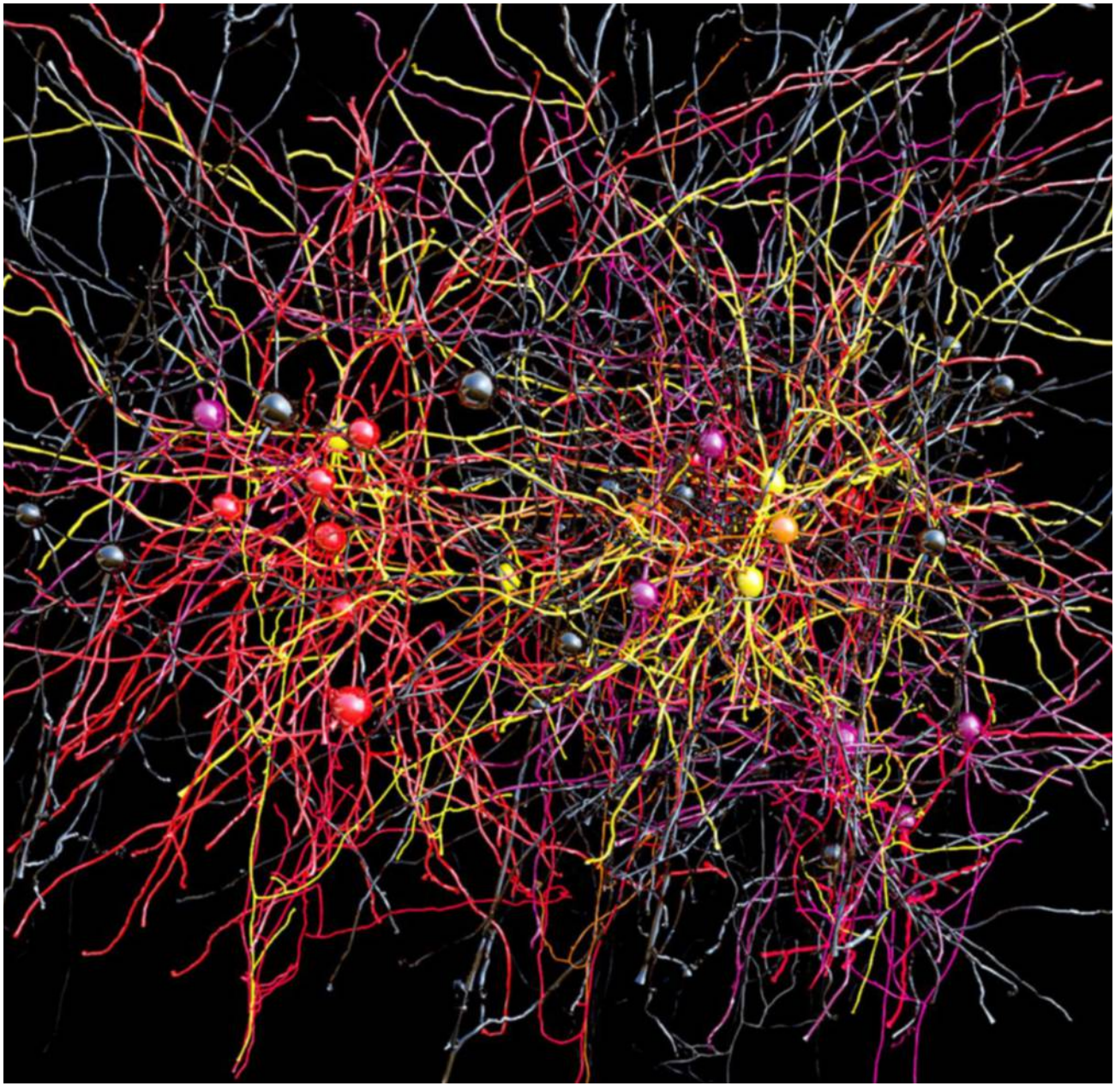
DES OBSERVATIONS INDIRECTES

Pour localiser une source de rayonnement cosmique à partir de la surface terrestre, les scientifiques doivent recourir à des observations indirectes. Par chance, les interactions des rayonnements cosmiques avec la matière interstellaire créent des photons gamma qui se propagent en ligne droite comme la lumière visible. À leur arrivée dans la haute atmosphère, ces photons gamma interagissent avec la matière présente et engendrent une cascade de particules qui émettent des ondes radio, ainsi qu'un flash bleuté ténu et extrêmement bref, le « rayonnement Tcherenkov ». Celui-ci est capté par des instruments tel Hess, avec la promesse de déterminer la direction des rayons gamma d'origine, et donc de localiser la source. Lofar mesure de son côté le rayonnement radio émis quand les particules cosmiques pénètrent dans la haute atmosphère. Leur origine n'est pas évidente à déterminer puisque ces particules ont été déviées par les champs magnétiques rencontrés lors de leur voyage dans l'espace.

(1) Collaboration Hess, *Nature, 531,* 476, 2016.

(2) S. Buitink *et al., Nature, 531,* 70, 2016.

TOP-FOTO, ASSEN



Carte en 3D des réseaux neuronaux

Cette carte du cortex visuel de la souris, la plus grande représentation en 3D des connexions neuronales jamais reconstruite (0,5 millimètre de côté environ), fait apparaître 50 neurones fonctionnels. Les filaments représentent les prolongements des neurones, dendrites et axones. Leur couleur informe sur leur activité en réponse à des stimuli visuels de différentes orientations. Les grandes sphères sont le noyau des neurones, et les plus petites les synapses. Couplant imagerie physiologique et microscopie électronique à grande échelle, une équipe américano-belge a ainsi pu comprendre à l'aide de ce type de carte comment les neurones étaient sélectionnés. Cette technique de «connectomique fonctionnelle» offre aux biologistes un outil puissant, capable de dévoiler le fonctionnement et l'organisation logique des réseaux neuronaux.

Philippe Pajot

W. A. Lee *et al., Nature,* doi : 10.1038/nature17192, 2016.

CLAYREID,ALLENINSTITUTE;WEI-CHUNGLEE,HARVARDMEDICALSCHOOL;SAMINGERSOLL,GRAPHICARTIST

Comment prédire les propriétés des polymères ?

Accélérer la conception de matériaux polymères. Telle est la promesse de cet algorithme capable de prédire les structures atomiques les plus performantes en fonction des propriétés électriques désirées.

Les chimistes troqueront-ils bientôt leur blouse et leur paillasse contre un ordinateur ? Une équipe de l'université du Connecticut en fait le pari. Là où le chimiste procédait de façon empirique, par essai-erreur, guidé par son intuition et de solides connaissances théoriques, ces chercheurs ont mis au point un algorithme capable de lister automatiquement des matériaux correspondant aux propriétés électriques souhaitées ainsi que leurs configurations moléculaires (1).

L'étude se limite à une classe de matériaux particuliers : les polymères. Ces molécules sont caractérisées par l'enchaînement d'un ou de plusieurs atomes formant des motifs qui se répètent périodiquement. *« Ces matériaux sont particulièrement prometteurs pour les nouvelles générations de condensateurs,* souligne Gilbert Teyssèdre, du laboratoire du CNRS Laplace, à Toulouse. *Mais jusqu'ici, l'analyse de nouveaux polymères demandait beaucoup de temps : il fallait réaliser des calculs quantiques complexes et coûteux en temps pour déterminer leur capacité de stockage d'énergie. Or ce nouvel algorithme permet de prédire cette capacité sans passer par l'ensemble de ces calculs quantiques. »* De quoi accélérer l'étape préliminaire qui consiste à passer en revue les matériaux les plus prometteurs pour une application donnée.

Pour y arriver, l'équipe américaine a commencé par constituer une base de données réunissant 284 polymères construits à partir des sept unités chimiques les plus fréquentes : CH_2, NH, CO, C_6H_4, C_4H_2S, CS et O. Au moyen de modèles quantiques, elle a estimé avec une grande précision les propriétés électriques de chacun de ces polymères : la « bande interdite » (qui traduit la quantité d'énergie nécessaire à un électron pour se libérer de l'attraction de son atome d'origine et circuler librement dans le matériau), et la « constante diélectrique » qui rend compte de la façon dont un matériau réagit à un champ électrique. Ensemble, ces deux propriétés permettent de déterminer le caractère isolant de chaque polymère et surtout la quantité d'énergie qu'il peut stocker.

Entraîné sur cette base de données très précise, l'algorithme a pu dégager par lui-même une sorte de loi générale reliant la configuration atomique des polymères à leurs propriétés électriques. Résultat : confronté à un matériau polymère inconnu, l'algorithme en prédit avec précision les propriétés électriques, à condition que le matériau en question soit construit à partir d'au moins un des sept blocs chimiques cités plus haut. Réciproquement, à partir des propriétés électriques souhaitées, l'algorithme – que l'on peut tester en ligne (2) – calcule les configurations optimales correspondantes.

L'ALGORITHME A PU DÉGAGER UNE LOI RELIANT LA CONFIGURATION ATOMIQUE ET LES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES

Pour autant, cette méthode n'est pas applicable dans tous les cas. *« Si l'on peut prédire avec exactitude la constante diélectrique et la bande interdite d'un polymère donné, ce n'est pas vrai avec la conductivité électrique dont la valeur théorique est souvent éloignée de la valeur réelle »*, prévient Gilbert Teyssèdre. Or cette propriété, qui traduit la facilité avec laquelle le courant électrique circule dans le matériau, est incontournable pour quiconque souhaite caractériser un nouveau matériau. Le chimiste aura donc encore besoin de tester son intuition sur la paillasse.

Gautier Cariou

7

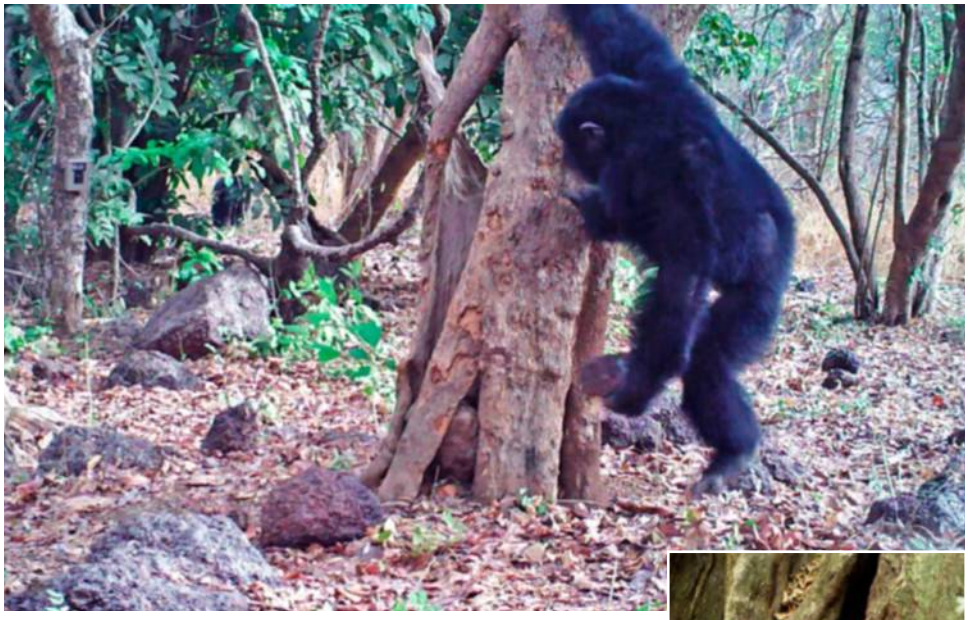
UNITÉS CHIMIQUES constituent les 284 polymères à partir desquels le nouvel algorithme s'est entraîné.

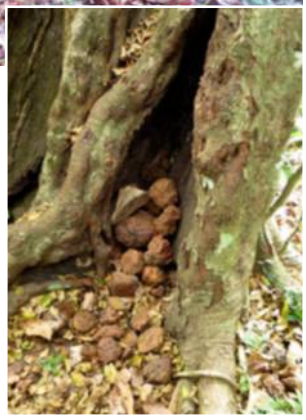
(1) A. Mannodi-Kanakkithodi *et al.*, *Scientific Reports*, doi:10.1038/srep20952, 2016.

(2) www.khazana.uconn.edu

Étrange rituel chez les chimpanzés

En Afrique de l'Ouest, des chimpanzés ont été filmés en train de jeter des pierres sur des arbres creux, où elles s'accumulent. Mais pourquoi ?





▲ *Les chimpanzés lancent des pierres qui forment des tas au pied des arbres (en bas). Ces agissements vont peut-être au-delà d'une simple démonstration de force.*

Un chimpanzé mâle adulte se donne en spectacle. Il trépigne, tambourine sur le premier arbre venu, en s'accompagnant d'un « halètement-hululement » (« pant-hoot »), vocalisation qui grimpe dans les aigus. Les primatologues ont décrit de multiples variantes de ce comportement banal d'intimidation, le « male display ». En mars 2011, une caméra-piège en capte une nouvelle variation en Guinée : en plus des ingrédients habituels, le chimpanzé lance violemment une pierre sur un arbre, au pied duquel on avait remarqué un tas de projectiles.

Ce comportement inédit a convaincu une équipe de l'Institut Max-Planck d'anthropologie évolutionnaire de Leipzig, en Allemagne, dirigée par Christophe Boesch, de se lancer dans une vaste enquête. Grâce au « Programme Pan africain : le chimpanzé cultivé », qui fédère de nombreuses équipes présentes en Afrique, des observations normalisées sur cet étrange comportement ont été collectées auprès de 51 groupes de chimpanzés.

La synthèse de ces travaux vient d'être publiée sur le site Scientific Reports de *Nature* (1). Surprise : on ne signale le phénomène que sur quatre sites, en Afrique de l'Ouest. Tout indique qu'il s'agit d'un trait culturel, transmis de génération en génération. Mais quel rôle joue-t-il ? S'agit-il d'un simple enrichissement du « male display », afin d'améliorer par exemple sa propagation sonore dans la forêt ? Ou bien, seconde hypothèse formulée par les auteurs, ces sites d'accumulation de pierres auraient-ils une valeur symbolique ? Et les primatologues de risquer un parallèle, non sans précautions oratoires, avec les monticules d'origine humaine observés au pied « d'arbres sacrés ». À partir de là, certains articles de la grande presse sont allés jusqu'à parler de religion chimpanzée…

NI SPIRITUEL, NI RELIGIEUX

« Ces observations sont très intéressantes, estime Andrew Whiten, un chercheur de l'université de Saint-Andrews en Écosse, pionnier des cultures chimpanzées, *mais elles ne suggèrent en rien une explication relevant du spirituel ou du religieux. Dans les montagnes de Mahale en Tanzanie, les chimpanzés aiment jeter des pierres dans l'eau pour ajouter des éclaboussures à leur démonstration de force* (2). *Le nouveau comportement publié me fait penser à cela. »*

« Étrange comportement, admet quant à lui Frans de Waal, directeur du Living Links Center au Yerkes National Primate Research Center, à Atlanta. *Je pense que "rituel" est le mot qui convient, mais des termes tels que "sacré", "religieux" ou "spirituel" conduiraient à une exagération par rapport à ce que nous savons. Nous avons besoin d'en savoir plus sur les circonstances dans lesquelles ce comportement apparaît ».*

Pierre Vandeginste

(1) H.S. Kühl *et al., Sciencific Reports, 6,* 22219, 2016.

(2) A. Whiten *et al., Nature, 399,* 682, 1999.

MPI-EVA_PANAFCHIMBO FOUNDATION

Des mathématiciens pour coacher les sportifs

Les mathématiciens peuvent rapporter des médailles ! Pas seulement des médailles Fields mais aussi de vraies médailles aux Jeux olympiques. Pour cela, inutile d'installer des pistes d'athlétisme au sein de chaque laboratoire. Il suffit de les laisser participer à la préparation de nos futurs champions. À côté du physiologiste, du biomécanicien ou du coach mental, le matheux apporte une analyse des performances qui peut se révéler utile.

PRENONS UN BON COUREUR et essayons de comprendre la façon dont il exploite son potentiel de départ afin d'obtenir le meilleur chrono (indépendamment d'autres concurrents). Sur un 400 mètres, il commence par une accélération maximale puis, une fois la vitesse de pointe atteinte, décélère jusqu'à l'arrivée. Sur une plus longue distance, comme un 1 500 mètres, la course se termine invariablement par une réaccélération. Ces façons de gérer l'effort sont issues d'une longue expérience alliant l'expertise des entraîneurs et les sensations des athlètes. On peut toutefois se demander si cet empirisme fournit la meilleure performance possible. Le mathématicien répond à cette question en trois temps.

> « L'ANALYSE DES PERFORMANCES PEUT SE RÉVÉLER UTILE À LA PRÉPARATION DE NOS FUTURS CHAMPIONS »

MODÉLISER L'ÉPREUVE SPORTIVE est la première phase. Il s'agit de trouver l'ensemble des équations qui lient les paramètres de l'effort (vitesse instantanée, énergie dissipée, force de propulsion, débit maximum d'oxygène inspiré ou VO_2max). Ces équations reposent sur des principes physiques simples et bien connus : la conservation de l'énergie et le principe fondamental de la dynamique. Le premier modèle simplifié de cette étude de performance, publié dans un article du mathématicien américain Joseph B. Keller, date de 1974, mais de nombreux autres, plus réalistes, ont été étudiés depuis.

ESTIMER LES PARAMÈTRES PROPRES du sportif qui apparaissent dans le système d'équations précédent est la deuxième phase. Citons l'économie de course ou la force de propulsion maximale. Les statistiques « inférentielles » permettent d'estimer au mieux les paramètres recherchés à partir d'épreuves chronométrées particulières avec de nombreux temps de passage.

LA THÉORIE DE LA COMMANDE OPTIMALE (ou du contrôle optimal) est utilisée dans la troisième phase. Elle permet de trouver la solution d'un système d'équations qui maximise un critère de performance donné au préalable. Pour un coureur, on cherche l'évolution de la vitesse instantanée (qui permet de savoir quand accélérer) qui minimise la durée de la course étant donné son potentiel (force de propulsion liée à sa musculature, énergie aérobie liée à son alimentation…).

PASSONS AUX RÉSULTATS : on remarque que les meilleures stratégies correspondent aux pratiques des champions. Cela légitime l'approche et valide l'adéquation du modèle physique (autrement dit, le modèle intègre suffisamment de détails de la course pour la retranscrire avec fiabilité). Cela semble une fausse bonne nouvelle : pourquoi embaucher des mathématiciens dans les équipes olympiques si les résultats obtenus sont déjà connus des directeurs techniques ? Tout simplement parce que, dans le modèle mathématique, on peut facilement faire varier des paramètres physiologiques et en déduire la variation de performance associée. Augmenter la force de propulsion maximale modifie relativement peu la performance finale (malgré une hausse de la vitesse de pointe) alors qu'une augmentation de l'économie de course la change plus nettement. Le travail mathématique permet donc de prescrire un entraînement plus adapté à l'objectif chronométrique.

Roger Mansuy, professeur au lycée Louis-le-Grand, à Paris, nous raconte, chaque mois, un thème mathématique inspiré par un exposé grand public.

Retrouvez la table ronde sur les travaux d'Amandine Aftalion (CNRS-École polytechnique) : tinyurl.com/math-sport

DR

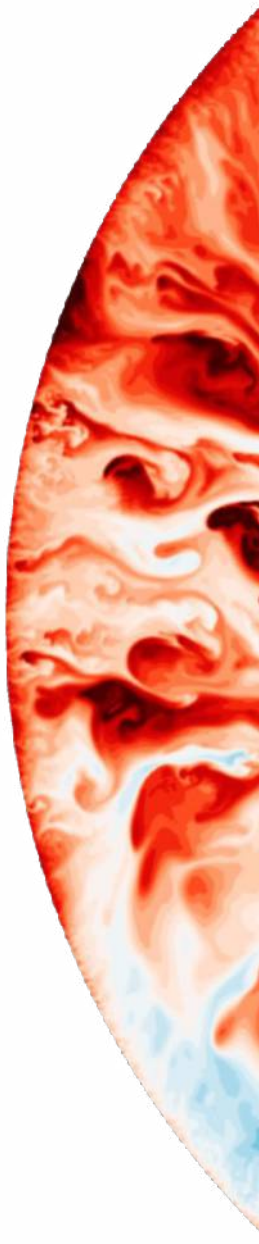
1 Chronique d'une inversion annoncée P. 36

2 Une dynamo au centre de la Terre P. 42

3 L'énigme du champ magnétique primitif P. 45

Champ magnétique

LA TERRE PERD-ELLE LE NORD ?



N. SCHAEFFER/CNRS/ISTERRE

Si nos boussoles pointent vers le nord, c'est à cause du champ magnétique produit au cœur de la Terre. Avec des simulations et des expériences en laboratoire, les géophysiciens mettent en lumière cette véritable dynamo et sa naissance, voici plus de trois milliards d'années. Mais ce champ fluctue et se retourne parfois complètement. Les paléomagnéticiens cherchent sur le terrain les signes de ces inversions passées. Aujourd'hui, l'intensité globale du champ magnétique baisse. Nos boussoles pointeront-elles bientôt vers le sud ?

Les panaches rouges et bleus dans cette simulation numérique du noyau liquide de la Terre montrent les variations de températures de la matière. C'est ici que naît le champ magnétique terrestre.

1

Chronique d'une inversion annoncée

Nous ne savons pas quand, mais il est sûr que le pôle Nord magnétique basculera au sud, comme cela s'est déjà produit à de nombreuses reprises. Pour expliquer le phénomène, géologues et paléomagnéticiens lisent dans les entrailles de la Terre.

Sylvain Guilbaud, journaliste

Repères

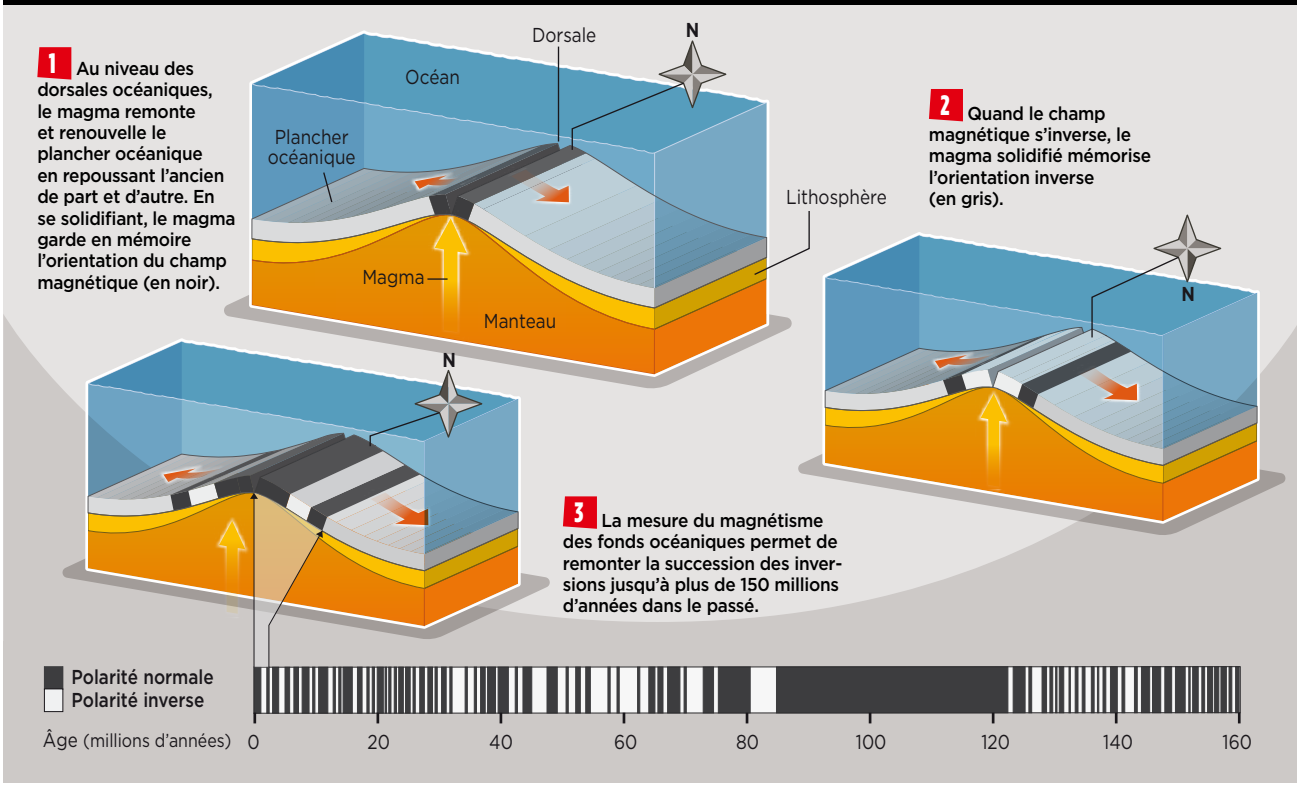
- **Le champ magnétique de la Terre s'est déjà inversé de multiples fois au cours des temps géologiques.**
- **Depuis plus d'un siècle, l'intensité du champ magnétique terrestre décroît. Cependant, rien ne permet de conclure qu'une inversion est en cours car ce phénomène s'étale sur plusieurs millénaires.**
- **En période d'inversion, notre planète serait plus vulnérable aux rayonnements venus de l'espace. Mais notre principale protection, l'atmosphère, resterait.**

S'il y a 800 000 ans, notre ancêtre *Homo erectus* avait inventé la boussole et suivi la direction de l'aiguille lors de ses migrations, il serait arrivé… au pôle Sud ! À l'époque, le champ magnétique de la Terre était en effet orienté dans le sens opposé à celui que nous connaissons aujourd'hui. Il y a 780 000 ans environ, la Terre a connu une inversion magnétique : un phénomène lors duquel le pôle Nord magnétique devient le pôle Sud et vice-versa. Ce phénomène n'est pas rare à l'échelle des temps géologiques. Les roches gardent les archives de plusieurs centaines d'inversions au cours des derniers 200 millions d'années. Pourtant, les chercheurs ne comprennent pas encore tous les détails de ces basculements, intimement liés aux mouvements dans le noyau de la Terre, lieu de naissance du champ magnétique. À côté de ces changements drastiques de polarité, le champ magnétique terrestre présente aussi des variations rapides : son intensité globale a par exemple chuté d'environ 10 % depuis cent cinquante ans. Rien ne dit qu'il s'agit d'un signe avant-coureur d'une inversion. Mais les pôles s'inverseront encore dans le futur de la Terre. Que pourrait-il alors se passer ?

Une histoire à RÉPÉTITION

À première vue, le champ magnétique terrestre est semblable à celui d'un grand barreau aimanté qui traverserait notre planète du nord au sud. Si l'on pouvait saupoudrer la Terre de limaille de fer, on verrait les paillettes s'orienter comme autant de boussoles et dessiner des boucles sortant au niveau du pôle Sud et rentrant au niveau du pôle Nord. Elles matérialiseraient les lignes de champ similaires à celles qui apparaissent autour d'un aimant lors de l'expérience souvent réalisée en cours de physique. Ce champ est qualifié de « dipolaire ». C'est à plus de 2 900 kilomètres sous nos pieds que le champ magnétique trouve son origine, dans les complexes mouvements de convection qui agitent le noyau de la Terre, essentiellement constitué de fer liquide (lire p. 42).
Cependant, ce champ magnétique fluctue. Il peut même complètement s'inverser. Le géo-

Fig. 1 Le passé des inversions magnétiques retracé au fond des océans


1 Au niveau des dorsales océaniques, le magma remonte et renouvelle le plancher océanique en repoussant l'ancien de part et d'autre. En se solidifiant, le magma garde en mémoire l'orientation du champ magnétique (en noir).
Dorsale
N
Océan
Plancher océanique
Lithosphère
Magma
Manteau
2 Quand le champ magnétique s'inverse, le magma solidifié mémorise l'orientation inverse (en gris).
N
N
3 La mesure du magnétisme des fonds océaniques permet de remonter la succession des inversions jusqu'à plus de 150 millions d'années dans le passé.
Polarité normale
Polarité inverse
Âge (millions d'années)
0
20
40
60
80
100
120
140
160

physicien français Bernard Brunhes fut le premier à le suspecter en 1904. En étudiant dans le Massif central une ancienne coulée de lave et les argiles sous-jacentes, il constate que leur aimantation pointe vers le sud. Il en déduit qu'à l'époque de l'éruption, le champ devait être orienté en sens inverse. *« Beaucoup de roches contiennent des oxydes de fer telles les magnétites, qui se comportent comme de microscopiques boussoles,* explique Sébastien Nomade, géophysicien au laboratoire des sciences du climat et de l'environnement du CEA à Saclay. *Lorsque la lave est très chaude, ces boussoles s'agitent dans tous les sens. Mais quand la lave refroidit sous la température de Curie, soit 580°C pour les magnétites, celles-ci se figent dans la direction du champ magnétique présent à l'époque. On parle d'aimantation thermorémanente. »*

Les coulées de lave sont ainsi des archives de choix pour les paléomagnéticiens, qui étudient l'évolution du champ magnétique terrestre sur des millions, voire des milliards d'années. D'autres archives précieuses sont les sédiments. L'érosion par les cours d'eau charrie notamment des particules d'oxydes de fer vers les océans, ou les lacs. Celles-ci tombent progressivement au fond et sédimentent en prenant l'orientation du champ magnétique. C'est l'aimantation détritique rémanente. *« En quelque sorte, les coulées de lave donnent des instantanés du champ magnétique alors que les sédiments offrent davantage de continuité comme un film »*, résume Sébastien Nomade.

CODE-BARRES GÉOLOGIQUE

La théorie de Bernard Brunhes n'est pourtant pas acceptée tout de suite. *« Il faut attendre les années 1950 et l'essor des méthodes de datation, notamment la technique du potassium-argon,* rappelle Jean-Pierre Valet, paléomagnéticien à l'Institut de physique du globe de Paris. *On remarque que des roches de différentes compositions, de provenances géographiques diverses, mais de même âge, indiquent le même sens du champ magnétique. »* Les chercheurs établissent alors des échelles de « polarité géomagnétique », qui montrent la succession des retournements des pôles sur plusieurs millions d'années, avec des périodes « normales » (comme actuellement) et des périodes « inverses ». Ces échelles sont notamment établies grâce à la mesure de l'aimantation des fonds marins (Fig. 1) à la fin des années 1960. Au milieu des océans, le •••

580°C

C'EST LA TEMPÉRATURE DE LA LAVE en dessous de laquelle les particules magnétiques se figent dans la direction du champ magnétique terrestre.

INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

••• magma remonte en permanence au niveau des dorsales et se solidifie en enregistrant l'orientation du champ magnétique et en « poussant » l'ancien plancher océanique de part et d'autre de la dorsale. Les mesures magnétiques révèlent ainsi une sorte de code-barres symétrique par rapport à la dorsale, où alternent des bandes de champ magnétique « normal » et « inverse », remontant jusqu'à 180 millions d'années, l'âge des plus anciens fonds océaniques.

Les coulées de laves continentales et les sédiments permettent de remonter encore plus loin dans le passé des renversements magnétiques. *« De très vieilles inversions, il y a environ 2,7 milliards d'années, ont été détectées dans la région de Pilbara en Australie,* précise Jean-Pierre Valet. *Une étude mentionne une inversion dès l'Archéen, il y a 3,2 milliards d'années, mais les données sont délicates à vérifier. »* Dans tous les cas, les inversions sont des phénomènes fréquents à l'échelle de la Terre. *« Sur les derniers 5 millions d'années, il y en a en moyenne une tous les 250 000 ans »*, note Hagay Amit, géophysicien au laboratoire de planétologie et géodynamique à Nantes. *« Mais cela masque beaucoup d'irrégularités,* nuance Jean-Pierre Valet. *Ainsi, certaines périodes ont connu beaucoup d'inversions, tandis que d'autres, appelées "superchrons", n'en ont connu aucune. Ainsi, au Crétacé, aucune trace d'inversion n'a été trouvée durant près de 40 millions d'années. »* ■

À QUAND LE BASCULEMENT ?

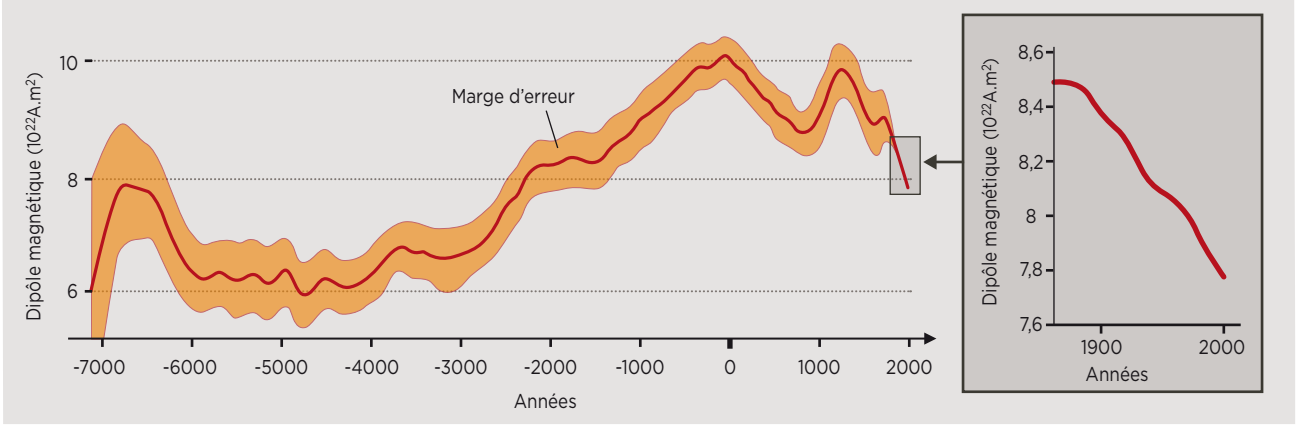
La Terre n'a pas connu d'inversion magnétique depuis 780 000 ans, soit plus de trois fois la durée moyenne séparant deux inversions dans les derniers millions d'années. Rien n'indique que ce phénomène se soit brusquement arrêté. Au contraire, depuis les années 1840, époque où commencèrent les premières mesures directes du champ magnétique terrestre, l'intensité du dipôle a diminué de façon continue de 10 %. De plus, les observations révèlent une zone où le champ magnétique est anormalement faible au-dessus de l'Atlantique sud. S'agit-il des signes précurseurs d'une inversion prochaine ?

Afin de le savoir, il faut se plonger dans les mécanismes qui engendrent ces inversions. *« Les données paléomagnétiques montrent que les inversions du champ magnétique sont précédées par de longues périodes de décroissance de l'intensité du champ magnétique. Il s'agit de l'indice le plus fort »*, remarque Jean-Pierre Valet. Dans ces périodes qui durent plusieurs milliers d'années, le champ magnétique perd jusqu'à 90 % de sa

▼ **L'intensité du champ magnétique fluctue, même en dehors des périodes d'inversion. La décroissance actuelle se situe dans la moyenne de ces variations.**

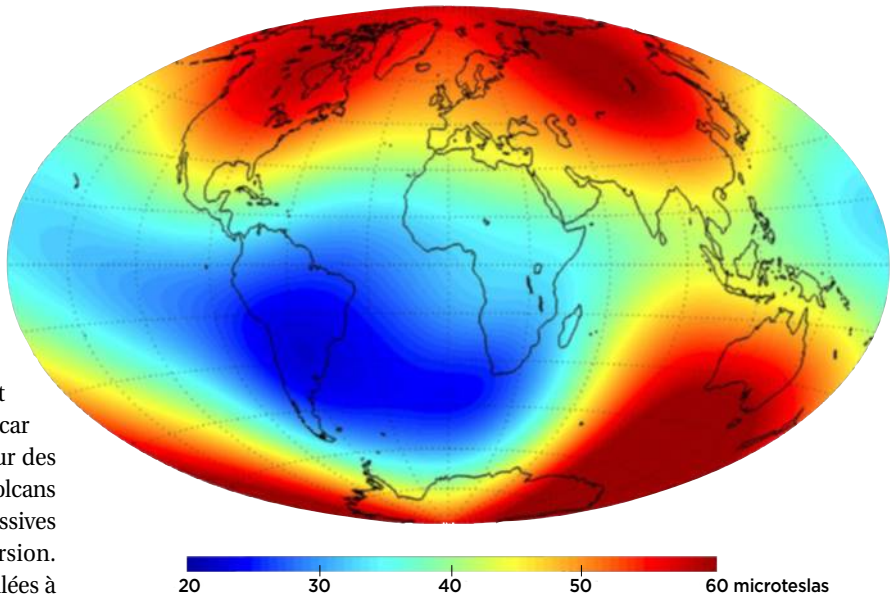
Source : M. Korte *et al., Earth and planetary science letters, 312,* 497, 2011.

Fig.2 Intensité du dipôle magnétique depuis 9 000 ans



INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

valeur, peut-être plus. Puis il met encore quelques milliers d'années à « repousser », soit dans le sens inverse, soit dans le même sens : on parle alors d'excursion magnétique et non d'inversion.
Mais entre ces deux phases de décroissance et de regain d'intensité, en combien de temps s'effectue le basculement des pôles ? La question n'est pas tranchée car les archives sont difficiles à décrypter sur des échelles de temps courtes. Rares sont les volcans qui présentent des coulées de lave successives permettant de retracer toute une inversion. Quand c'est le cas, la datation de ces coulées à quelques centaines d'années près est une gageure. Les sédiments offrent plus de continuité, mais la totalité de l'événement, c'est-à-dire près de 10 000 ans d'histoire, se trouve condensée sur quelques centimètres. Difficile également d'avoir une précision de l'ordre du siècle. *« Mon avis est que le basculement intervient en 1 000 ans au plus une fois que le champ magnétique a perdu 90 % de son intensité »,* estime Jean-Pierre Valet. Certaines mesures, comme dans le bassin des Apennins en Italie (1) ou dans la Steens Mountain dans l'Oregon (États-Unis), font état de basculement en cent ans voire moins, mais elles sont contestées. Certains chercheurs, tel Jean-Pierre Valet, proposent un mécanisme en trois étapes (2) qui débute par un basculement avorté des pôles magnétiques, puis par un basculement complet et enfin un « rebond » du dipôle magnétique avant qu'il ne se stabilise dans sa nouvelle orientation. Là encore, l'hypothèse fait débat.



▲ *Voici la carte du champ magnétique terrestre réalisée grâce aux satellites européens de la mission Swarm. Elle montre notamment une anomalie au niveau de l'Atlantique (en bleu foncé), caractérisée par un champ magnétique plus faible qu'ailleurs.*

SIMULATIONS PAR ORDINATEUR

Beaucoup de choses restent également à comprendre sur l'origine même des inversions magnétiques, c'est-à-dire des mouvements du noyau liquide de notre planète. Ainsi, en plus des observations paléomagnétiques, les physiciens simulent les inversions par ordinateur. En temps normal, le noyau liquide présente deux zones de polarité opposée : les lignes de champ magnétique « sortent » de l'hémisphère Sud et « rentrent » dans l'hémisphère Nord. *« Les simulations montrent que des mouvements de convection (*) chaotiques transportent des lignes de champ de l'intérieur du noyau jusqu'à la frontière avec le manteau, où elles donnent naissance à des taches de polarité inverse,* explique Hagay Amit. *Ces taches grossissent et font diminuer l'intensité globale du dipôle. Si ces zones grandissent suffisamment et se multiplient, il y a inversion. »*
Pour que le champ magnétique s'inverse, il faut donc que les mouvements de convection soient plus importants dans le noyau. Or, ceux-ci sont régulés par le flux de chaleur échangé à la frontière entre le noyau et le manteau. Plus ce flux est important, plus il y a de convection dans le noyau, et plus les inversions sont fréquentes. *« Nous pensons que l'action du manteau sur le long terme peut moduler la fréquence des inversions. Ceci pourrait expliquer pourquoi il existe des superchrons, ces longues périodes sans aucune inversion »,* détaille Jean-Pierre Valet.

Signes avant-coureurs d'inversion : une anomalie dans l'Atlantique sud et un champ magnétique moins intense

Revenons à aujourd'hui. Deux observations peuvent faire penser à des signes avant-coureurs d'inversion. D'une part, la diminution globale de l'intensité du champ magnétique, à un rythme similaire à celui des inversions passées et, d'autre part, l'anomalie de l'Atlantique sud (planisphère ci-dessus). *« Les observations satellites, en particulier celles de Swarm, montrent que cette zone correspond, au niveau du noyau, à une tache de polarité inverse,* note Arnaud Chulliat, géophysicien à l'université du Colorado aux États-Unis. *Mais il n'y a là rien d'anormal. »* •••

(*) **La convection** est un ensemble de mouvements qui animent un fluide et qui transportent de la chaleur. Par exemple, les mouvements de l'eau bouillante dans une casserole.

ESA/DTU SPACE

••• En effet, même en dehors des périodes d'inversion, le champ magnétique fluctue. Il se trouve que le champ n'est pas purement dipolaire. Environ 10 % de son intensité est due à une partie multipolaire, c'est-à-dire à des lignes de champ qui ne sont pas orientées selon l'axe nord-sud, et qui varient très rapidement. *« Ces variations expliquent pourquoi les pôles magnétiques dérivent de plusieurs dizaines de kilomètres par an, et pourquoi le champ magnétique ne change pas de la même façon en différents endroits du globe »*, indique Arnaud Chulliat. Par exemple, malgré la décroissance globale, l'intensité du champ magnétique augmente légèrement en France (3). La partie dipolaire varie aussi (Fig. 2). Et la valeur actuelle n'est pas particulièrement basse. *« Au contraire, l'intensité du dipôle magnétique est plus forte aujourd'hui que sa moyenne sur les derniers millions d'années »*, remarque Hagay Amit. *« Au rythme de décroissance actuel, il faudra près de 2000 ans pour que le champ magnétique perde 90 % de sa valeur*, analyse Jean-Pierre Valet. *Et même si cela arrive, il n'est pas sûr que le basculement se produise. »* Une inversion prise isolément reste donc un phénomène chaotique… et imprévisible. ■

(1) L. Sagnotti *et al., Geophysical Journal International, 199,* 1110, 2014.
(2) J.P. Valet *et al., Nature, 490,* 89, 2012.
(3) A. Genevey *et al., Geochem. Geophys. Geosyst., 14,* 2858, 2013.

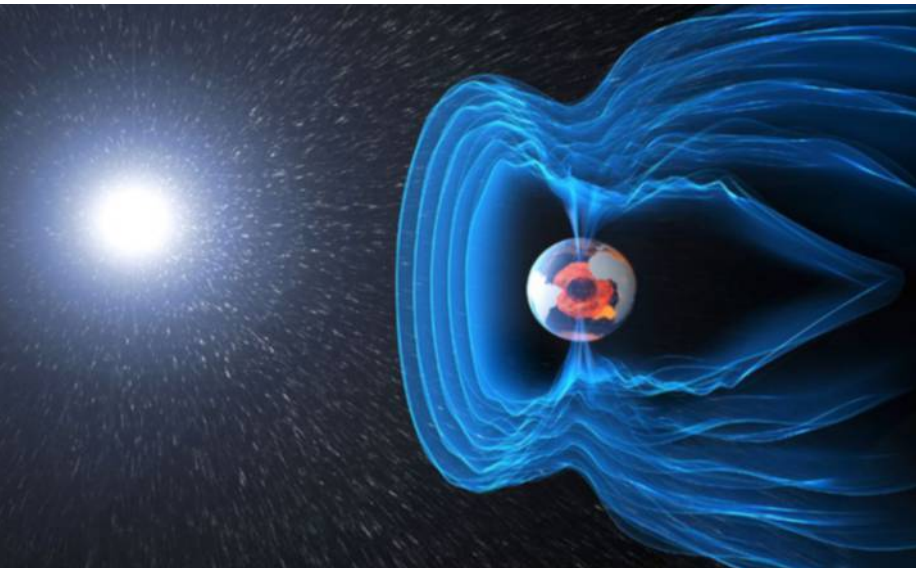
Les conséquences d'une INVERSION

Une inversion de la polarité du champ magnétique terrestre prend plusieurs millénaires. Les fluctuations observées actuellement restent dans les variations naturelles mesurées en dehors des périodes d'inversion. Mais si l'inversion n'est pas pour demain, il reste sûr que le phénomène se produira à nouveau dans l'histoire de la Terre.

Comme il s'agit d'un processus progressif, il ne faut pas s'attendre à des changements brusques et immédiats. L'intensité du champ magnétique terrestre n'a pas de conséquence directe sur la vie. Sa valeur est par exemple de 47 microteslas actuellement à Paris, une valeur très faible comparée aux aimants artificiels. Le champ magnétique d'un appareil IRM s'élève à plusieurs teslas, soit cent mille fois plus. De surcroît, nous ne sommes pas sensibles aux variations du champ magnétique et nous ne sentirions pas la valse des pôles. En revanche, certains animaux possèdent cette faculté sensorielle appelée magnétoréception. C'est le cas de certains oiseaux migrateurs. Mais d'une part, ce n'est pas leur seule boussole qui leur permet de s'orienter. D'autre part, les inversions sont si lentes que les espèces ont eu le temps de s'adapter par le passé. *« Enfin le mécanisme de magnétoréception chez les oiseaux est sensible à la direction, mais pas à la polarité du champ »*, affirme Roswitha Wiltschko, zoologue à l'université de Francfort-sur-le-Main (1).

Le champ magnétique de la Terre joue cependant un rôle important dans la protection vis-à-vis des particules qui arrivent de l'espace, et sa perte d'intensité pourrait poser problème. Notre planète reçoit des particules chargées comme des électrons et des protons, émis par le Soleil, ce qu'on appelle le vent solaire. Des particules plus énergétiques telles des atomes lourds arrivent aussi de régions plus éloignées de l'espace, par exemple celles où des étoiles explosent en éjec-

▼ *La magnétosphère et notamment les ceintures de Van Allen protègent la Terre des particules émises par le Soleil ainsi que des rayonnements cosmiques.*



ESA/ATG MEDIALAB

tant de la matière. Ces particules forment le rayonnement cosmique. Comme ces particules sont chargées, elles sont en partie déviées par le champ magnétique terrestre, dont la structure s'étend jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de kilomètres au-dessus de nos têtes (schéma page de gauche) et forme la magnétosphère. Des particules peuvent néanmoins traverser cette magnétosphère, notamment en étant guidées jusqu'aux pôles par les lignes de champ magnétique. Elles peuvent ainsi être la cause de rayonnements nocifs pour la santé.

GARE AUX TEMPÊTES SOLAIRES

Que se passerait-il en cas d'inversion ? La frontière de la magnétosphère se trouve en moyenne à 64 000 km d'altitude. On pense qu'elle serait descendue à 38 000 km lors de la dernière inversion, devenant plus perméable aux radiations. On sait d'ailleurs que, lors des inversions, les interactions plus fréquentes entre les rayons cosmiques et l'atmosphère augmentent la production de certains éléments radioactifs comme le carbone 14. *« Mais attention, notre principale protection contre les radiations reste l'atmosphère et non le champ magnétique,* rappelle Jean-Pierre Valet. *Aujourd'hui, la dose de rayonnement reçue annuellement est de l'ordre de 2,4 milliSieverts (mSv) et de 5 mSv à haute latitude. On peut estimer que la dose maximale reçue lors d'une inversion serait de l'ordre de 10 mSv par an. »* Par comparaison, la dose annuelle admise en France pour les travailleurs du nucléaire s'élève à 20 mSv. Cela n'empêche pas le paléomagnéticien de proposer un mécanisme indirect selon lequel la diminution de l'intensité du champ magnétique aurait précipité l'extinction des Néandertaliens (2) (lire encadré ci-dessus). Mais aucune corrélation n'a été observée entre les inversions et les grandes extinctions d'espèces (3).

Tous s'accordent en revanche pour affirmer qu'une baisse de l'intensité du champ magnétique, très importante lors d'une inversion, aurait des conséquences sur nos sociétés technologiques. On peut déjà constater les effets d'un champ magnétique faible au niveau de l'anomalie de l'Atlantique sud. *« À l'intérieur même de la magnétosphère, se trouvent d'immenses réservoirs de particules chargées, les ceintures de Van Allen,* explique Arnaud Chulliat. *Dans l'Atlantique sud, comme le champ est moins intense, ces ceintures se trouvent plus près de la Terre ».* Dans cette zone, on estime que chaque centimètre carré de satellite est bombardé par plus de 3 000 protons énergétiques par seconde. Cela peut dégrader les systèmes électroniques ou perturber l'orbite des satellites. C'est pourquoi le téléscope Hubble ne réalise aucune observation lorsqu'il survole cette zone. Malgré tout, en y mettant le prix, il est possible de blinder les instruments de manière efficace.

Au final, les événements les plus redoutables pour les technologies dont nous sommes dépendants seraient peut-être les tempêtes solaires. Celles-ci propulsent des particules chargées à plus de mille kilomètres par seconde vers la Terre. Elles provoquent les fameuses aurores boréales mais aussi des courants électriques transitoires dans l'atmosphère. Ceux-ci induisent en cascade des courants électriques au niveau de la surface terrestre, surtout aux hautes latitudes aujourd'hui, mais qui pourraient se généraliser en cas d'inversion magnétique. Ces courants mettent à mal les systèmes électriques, comme en 1989 au Québec, où la coupure d'électricité qu'ils ont causée a duré neuf heures. Depuis, les spécialistes travaillent à la mise en place de sous-réseaux électriques plus robustes. ■

(1) R. Wiltschko et W. Wiltschko, *Biosensors, 4,* 221, 2014.
(2) J.P. Valet et H. Valladas, *Quaternary Science Reviews, 29,* 3887, 2010.
(3) K.H. Glassmeier et J. Vogt, *Space sci. Rev., 155,* 387, 2010.

UNE INVERSION MAGNÉTIQUE MANQUÉE A-T-ELLE TUÉ NEANDERTAL ?

Il y a 40 000 ans environ, l'intensité du champ magnétique terrestre a fortement chuté en quelques milliers d'années. Ce prélude à une inversion n'a pas connu le retournement final puisque le champ a repoussé dans le même sens. Cette « excursion » magnétique, observée notamment dans les roches de Laschamp près de Clermont-Ferrand, est la dernière grande baisse du champ magnétique retrouvée dans les archives géologiques. À la même époque disparaissaient les derniers Néandertaliens en Europe. Pure coïncidence ? Jean-Pierre Valet, de l'Institut de physique du globe de Paris, a proposé un lien causal entre ces deux événements : ***« Avec la baisse du champ magnétique, l'interaction des rayons cosmiques avec des couches plus basses de l'atmosphère a pu produire du monoxyde d'azote, qui détruit la couche d'ozone aux moyennes et hautes latitudes. Cela a pu entraîner des effets délétères sur la santé à cause de l'exposition aux rayons ultraviolets ».*** **Pour Marylène Patou-Mathis, préhistorienne au Muséum national d'histoire naturelle,** ***« cette hypothèse est intéressante mais la disparition de cette espèce humaine était probablement engagée il y a 50 000 ans. Les meilleures hypothèses semblent sa faible démographie et un affaiblissement génétique ».***

C'EST LA DOSE DE RAYONNEMENT qui serait reçue annuellement en cas d'inversion magnétique : cela représente la moitié de la dose admise en France pour les travailleurs du nucléaire.

2

Une dynamo au centre de la Terre

La génération du champ magnétique résulte de mouvements dans le noyau liquide de la Terre. Les mécanismes précis restent toutefois délicats à appréhender.

Marine Bollard, journaliste

Repères

- **Le champ géomagnétique résulte d'un effet dynamo dû aux mouvements du métal liquide dans le noyau terrestre.**
- **Depuis une dizaine d'années, des modèles réduits du noyau terrestre utilisant du sodium liquide parviennent à révéler les forces en jeu.**
- **Les modélisations numériques expliquent certaines anomalies et l'évolution du champ magnétique mais ne répondent pas encore à toutes les questions.**

Tel un bouclier invisible, le champ magnétique terrestre dévie les particules du vent solaire et les particules cosmiques qui bombardent notre planète en permanence. Pour comprendre comment il est généré, il faut plonger dans les entrailles de la Terre. À des milliers de kilomètres sous la surface, un immense réservoir de métal en fusion, essentiellement composé de fer et porté à plusieurs milliers de degrés Celsius, tourbillonne en permanence. C'est le noyau terrestre. En son cœur, ce liquide abrite une graine solide de fer cristallisé, écrasée sous la pression des couches supérieures.

Cette structuration est responsable des mécanismes qui donnent naissance au champ magnétique. Dans la partie externe du noyau, entre 2900 et 5100 kilomètres de profondeur, le fer liquide forme un vaste océan dans lequel baignent des électrons libres : le noyau liquide est conducteur. *« Sous l'effet d'un champ magnétique ambiant, le mouvement de ce matériau conducteur induit des courants électriques. Ils parcourent le noyau terrestre et engendrent à leur tour un champ magnétique »,* explique Thierry Alboussière, de l'École normale supérieure de Lyon. C'est ce qu'on appelle la dynamo terrestre. Mais sans source d'énergie pour compenser la dissipation de chaleur par effet joule, le champ géomagnétique disparaîtrait en moins de 20000 ans. Pour avoir un champ magnétique sur de longues périodes, il faut donc maintenir des mouvements suffisamment intenses dans le noyau liquide. *« C'est à cette condition que la dynamo s'allume spontanément et se maintient, produisant le champ magnétique de la Terre à long terme »,* confirme Thierry Alboussière.

CONVECTION DANS LE NOYAU

Mais quel est le moteur des gigantesques remous qui brassent le noyau liquide ? La convection thermique et chimique, répondent les géophysiciens. En se refroidissant, le noyau perd quelques centaines de degrés par milliard d'années. Au cœur de la Terre, les pressions sont si élevées – environ 330 gigapascals, soit 3,3 millions de fois la pression atmosphérique – qu'elles ont une influence sur les échanges de chaleur entre le noyau et l'extérieur. La température varie entre la surface de la graine – 5000 °C environ – jusqu'à la frontière noyau-manteau – 3800 °C. Mais ce profil de température à l'équilibre, dit adiabatique, ne fait que conduire la chaleur. *« Tout excès, même minime, par rapport à ce profil de température suffit à perturber l'équilibre, et ainsi créer un mouvement naturel de convection par dissipation. Les matières chaudes, plus profondes, ont alors tendance à remonter vers l'extérieur en raison de la poussée d'Archimède. Elles finissent par refroidir et redescendre, formant des grandes zones de circulation, dites cellules de convection. »* Ainsi, une convection thermique s'installe à condition que le flux de chaleur à la frontière noyau-manteau soit supérieur au flux transporté le long du profil de température à l'équilibre.

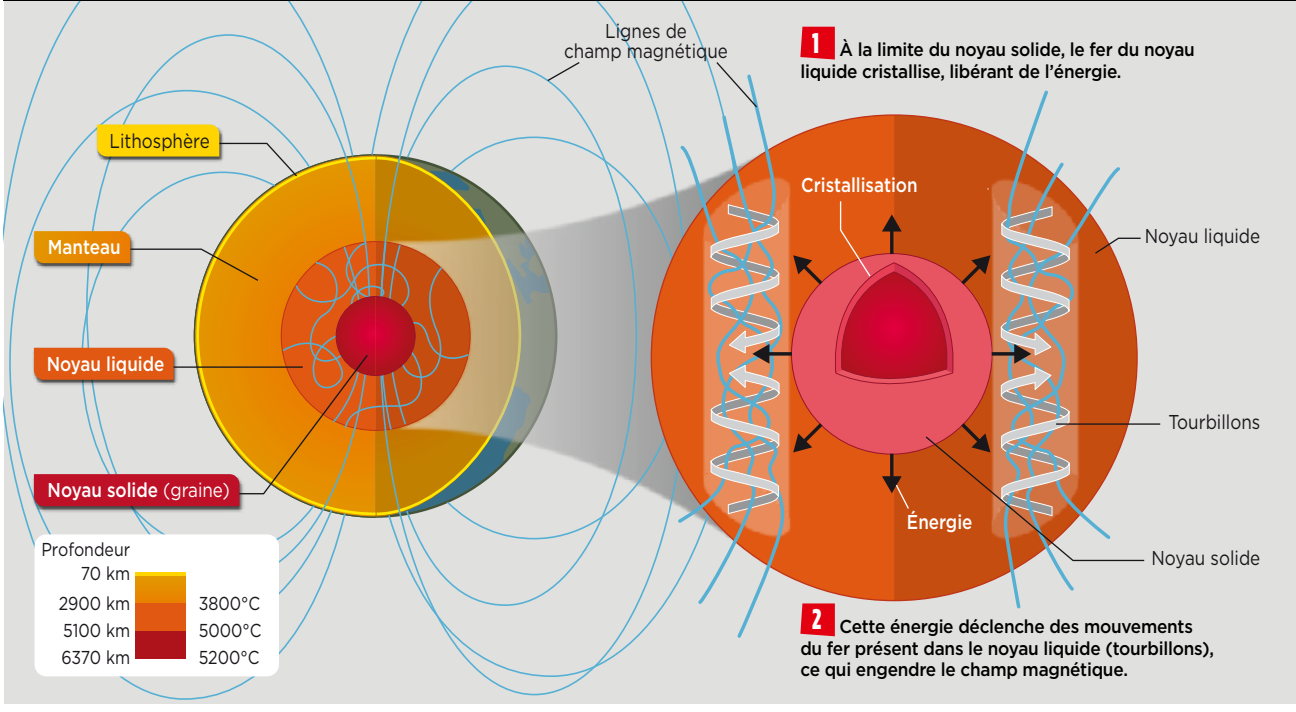
Cette dynamique du liquide est renforcée par un autre phénomène : la convection chimique ou convection solutale. Le noyau liquide, composé de fer presque pur, contient aussi une petite proportion d'éléments légers, des « impuretés », tels le soufre ou l'oxygène. Lorsque le fer liquide cristallise au voisinage de la graine, le liquide résiduel s'enrichit de ces éléments légers, de la même façon que lorsque l'eau de mer se transforme en glace, l'eau alentour s'enrichit en sel (puisque la glace n'est pas salée). Ces éléments légers remontent alors en panaches dans le noyau liquide, ajoutant encore du mouvement de convection et libérant de l'énergie gravitationnelle. C'est l'ensemble de ces mouvements au sein du noyau liquide – convection thermique et convection chimique – qui engendrent le champ magnétique terrestre par effet dynamo. En termes d'énergie dissipée, la convection chimique est même le principal moteur de la dynamo.

Toutefois, le fait qu'il y ait de la convection est bien le seul principe qui fait consensus aujourd'hui. Les mécanismes précis qui gouvernent les écoulements au cœur du noyau liquide, quant à eux, ne font pas l'unanimité. À partir des années 2000, les géophysiciens ont commencé à proposer des modèles numériques de plus en plus élaborés pour décrypter ces écoulements de matière. Alexandra Pais, de l'université de Coimbra, au Portugal, et Dominique Jault, de l'Institut des sciences de la Terre de Grenoble, par exemple, ont réussi à retrouver des données géomagnétiques à l'aide de simulations. Une de leurs hypothèses : les écoulements de matière prennent la forme de grandes colonnes parallèles à l'axe de rotation de la Terre (1). Ces dernières tournent dans un sens ou dans l'autre, pareil à des cyclones ou anticyclones qui viendraient lécher le manteau. (Fig. 1)

L'ASYMÉTRIE À L'ÉPREUVE DES TESTS

Des questions restent pourtant en suspens. Par exemple, le champ magnétique n'est pas réparti de la même manière entre les deux hémisphères. Comment l'expliquer ? Les mesures du siècle dernier enregistrent en effet plus de variations du champ au niveau de l'hémisphère atlantique qu'au niveau du pacifique. Le modèle numérique élaboré par Julien Aubert, de l'Institut de physique du globe de Paris en 2013, répond •••

Fig.1 D'où vient le champ magnétique terrestre ?



INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

10 KM/AN

C'EST LA VITESSE estimée des écoulements de fer liquide à la surface du noyau.

••• en partie à cette question (2). *« Nous obtenons un grand tourbillon excentré, qui tourne autour de la graine. Il passe plus près de celle-ci dans l'hémisphère est et plus près du manteau dans l'hémisphère ouest. Léchant ainsi le manteau de manière plus prononcée sous l'Atlantique que sous le Pacifique »*, explique Julien Aubert. Selon lui, ce tourbillon serait dû au couplage entre le manteau terrestre et la graine solide. *« Les deux interagissent au travers des forces gravitationnelles et tournent vers l'est à la même vitesse. Le noyau liquide externe, moins rapide, serait donc entraîné vers l'ouest. Ce mouvement relatif du noyau liquide déplace le champ magnétique induit dans la même direction »*, propose-t-il. Une hypothèse qui a aussi l'avantage d'expliquer la dérive vers l'ouest du pôle Nord magnétique, observée depuis quelques siècles.

Mais ces variations du champ magnétique à l'échelle du siècle restent mystérieuses. Thierry Alboussière évoque quant à lui une autre explication : la cristallisation asymétrique de la graine. Depuis 2010, les géophysiciens supposent en effet que la graine solide est en perpétuelle régénération (3). D'après ce modèle, la graine cristallise préférentiellement du côté est et fond du côté ouest. *« Puisque cette cristallisation préférentielle libère des éléments légers, elle pourrait accentuer la convection chimique d'un seul côté »*, souligne Annie Souriau, de l'Observatoire Midi-Pyrénées, à Toulouse. Ce déséquilibre modifierait la géodynamo et donc le champ magnétique terrestre.

L'expérience française DTS mime le combat entre les forces dues à la rotation de la Terre et celles dues au champ magnétique

À défaut de pouvoir sonder avec précision les entrailles de la planète, les chercheurs ont recours à des expériences de laboratoire. Fin 1999, des scientifiques lettons et allemands ont réussi à reproduire cet effet dynamo pour la première fois. Ils se sont servis de modèles réduits et de plusieurs mètres cubes de sodium liquide, excellent conducteur électrique, représentant le noyau métallique. *« Mais dans ce cas, les écoulements du sodium sont très contraints et restent éloignés de ce qui se passe au centre de la Terre »*, souligne Henri-Claude Nataf, de l'Institut des sciences de la Terre de Grenoble. Plusieurs équipes se sont donc lancées dans une deuxième génération d'expériences, avec des écoulements plus turbulents ou plus proches des conditions naturelles.

C'est le cas de l'expérience française DTS (pour Derviche Tourneur Sodium) de l'équipe Géodynamo de l'Institut des sciences de la Terre de Grenoble, qui mime le combat entre les forces de Coriolis – liées à cette rotation de la Terre – et les forces de Lorentz – dues au champ magnétique lui-même. Sa géométrie est comparable à celle de la Terre : une sphère en inox de 42 centimètres de diamètre, remplie de sodium liquide, contient en son centre une coquille de cuivre emprisonnant un aimant permanent. Chacune des deux sphères peut tourner indépendamment de l'autre autour d'un même axe, ce qui permet de reproduire des mouvements de rotation comme dans la Terre.

FIN POSSIBLE DE LA DYNAMO ?

« Grâce à DTS, explique Henri-Claude Nataf nous avons montré que le seul effet du champ magnétique induit par l'aimant entraînait une super-rotation du fluide qui l'entoure (plus rapide que celle de la sphère interne). Et qu'un écoulement turbulent pouvait amplifier un champ magnétique imposé au départ, comme dans le cas d'une dynamo planétaire. En revanche, si cette turbulence dépasse un certain seuil, la création de l'effet dynamo devient impossible. » *Pas si simple de manipuler de telles maquettes et surtout de telles quantités de sodium liquide qu'il faut maintenir à plus de 98 °C, sa température de fusion.*

De son côté, Julien Aubert vient de proposer à l'aide de simulations numériques un scénario inédit de l'évolution du champ magnétique terrestre (4) *« en accord avec les mesures collectées par le trio de satellites Swarm, lancés en 2013 par l'Agence spatiale européenne »*. Selon lui, l'intensité du champ magnétique terrestre devrait continuer à baisser pendant plus d'une centaine d'années. La précieuse dynamo de la Terre est-elle vouée à disparaître comme celle de sa voisine Mars ? Seul l'avenir – des millions d'années à l'échelle des temps géologiques – nous le dira de façon certaine. ■

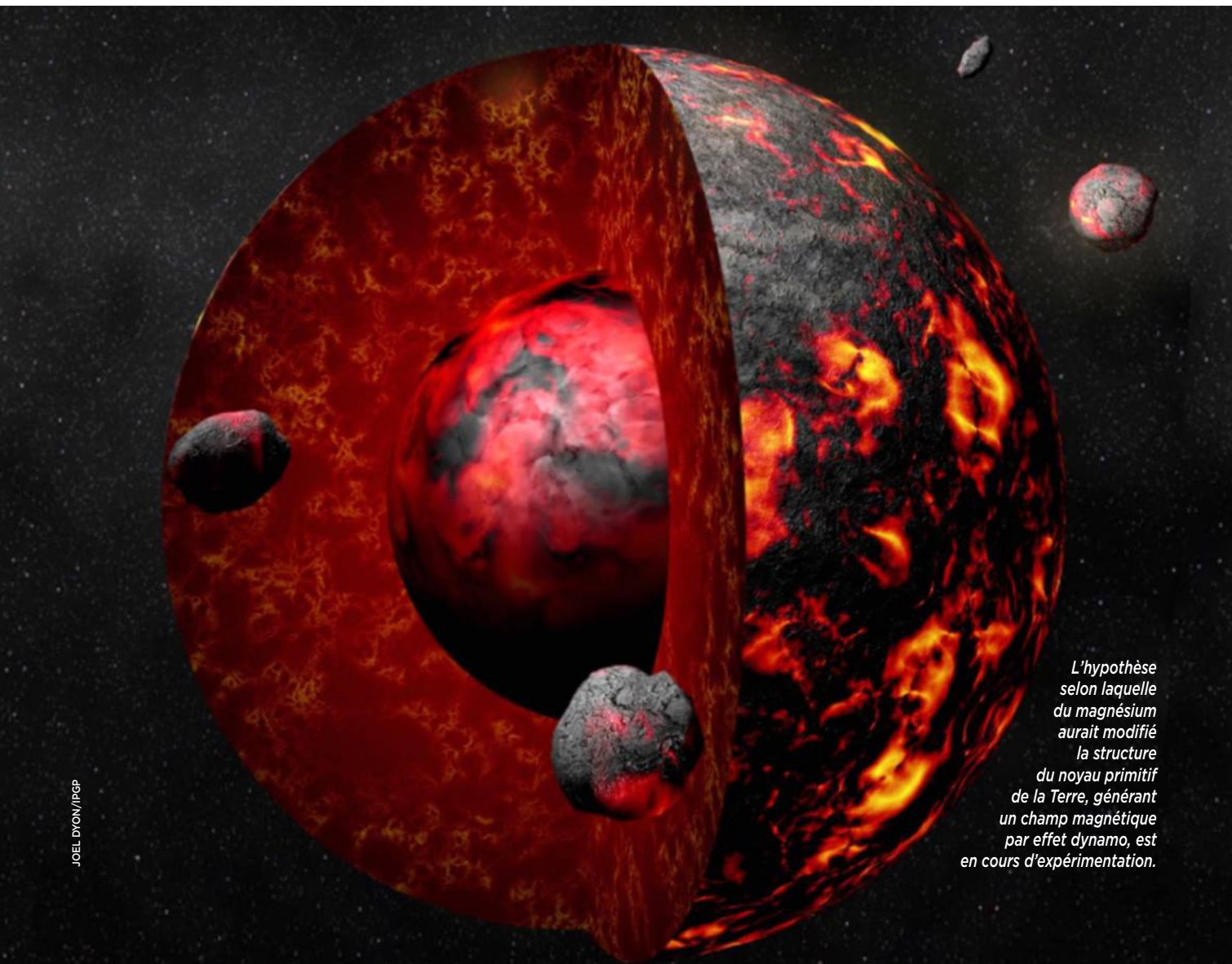
(1) M. Pais et D. Jault, *Geophys. J. Int., 173,* 421, 2008.
(2) J. Aubert *et al., Nature, 502,* 219, 2013.
(3) T. Alboussière *et al., Science, 466,* 744, 2010.
(4) J. Aubert, *Geophys. J. Int., 203,* 1738, 2015.

3

L'énigme du champ magnétique primitif

Il y a trois milliards d'années, le champ magnétique existait sur Terre. Pourtant, les conditions nécessaires à sa formation n'étaient pas réunies. Les géophysiciens expliquent enfin cet antagonisme.

Philippe Pajot, journaliste



JOEL DYON/IPGP

L'hypothèse selon laquelle du magnésium aurait modifié la structure du noyau primitif de la Terre, générant un champ magnétique par effet dynamo, est en cours d'expérimentation.

Repères

- **Les mécanismes qui engendrent le champ géomagnétique aujourd'hui nécessitent l'existence d'une graine solide en train de cristalliser au cœur de la Terre.**
- **L'étude de roches anciennes indique que le champ magnétique terrestre existait il y a plus de trois milliards d'années à une époque où la Terre ne comportait pas de graine.**
- **En supposant que le noyau terrestre comportait un léger excès de magnésium – un élément abondant du manteau –, un autre mécanisme explique la création du champ magnétique dans les débuts de l'histoire de la Terre.**

Si les aimants sont connus depuis l'Antiquité, ce n'est qu'entre le XVII[e] et le XIX[e] siècle que la compréhension des phénomènes magnétiques se fait jour. L'orientation des boussoles qui varie selon le lieu révèle que ce magnétisme est d'origine interne à la Terre. Aujourd'hui, le principe de la dynamo qui engendre le champ géomagnétique et l'histoire des inversions sont assez bien compris (lire p. 36). Mais si ce champ magnétique était présent dans le passé lointain de la Terre, qu'est-ce qui pouvait bien l'engendrer ? Le mécanisme de la dynamo requiert la présence d'une graine en train de se solidifier au cœur de la Terre, et selon toute vraisemblance, il n'y avait pas de graine il y a des milliards d'années… Une idée proposée vers 2007 par le géophysicien néo-zélandais David Stevenson, de Caltech, est maintenant testée et apporte une réponse satisfaisante à ce problème : l'adjonction d'une petite quantité d'un élément léger, tel le magnésium, dans le noyau de la Terre primitive, suffit à déclencher un autre type de dynamo produisant le champ magnétique très tôt dans l'histoire de notre planète (1). La géodynamo primordiale n'est plus un mystère.

EFFET DYNAMO PAR CONVECTION

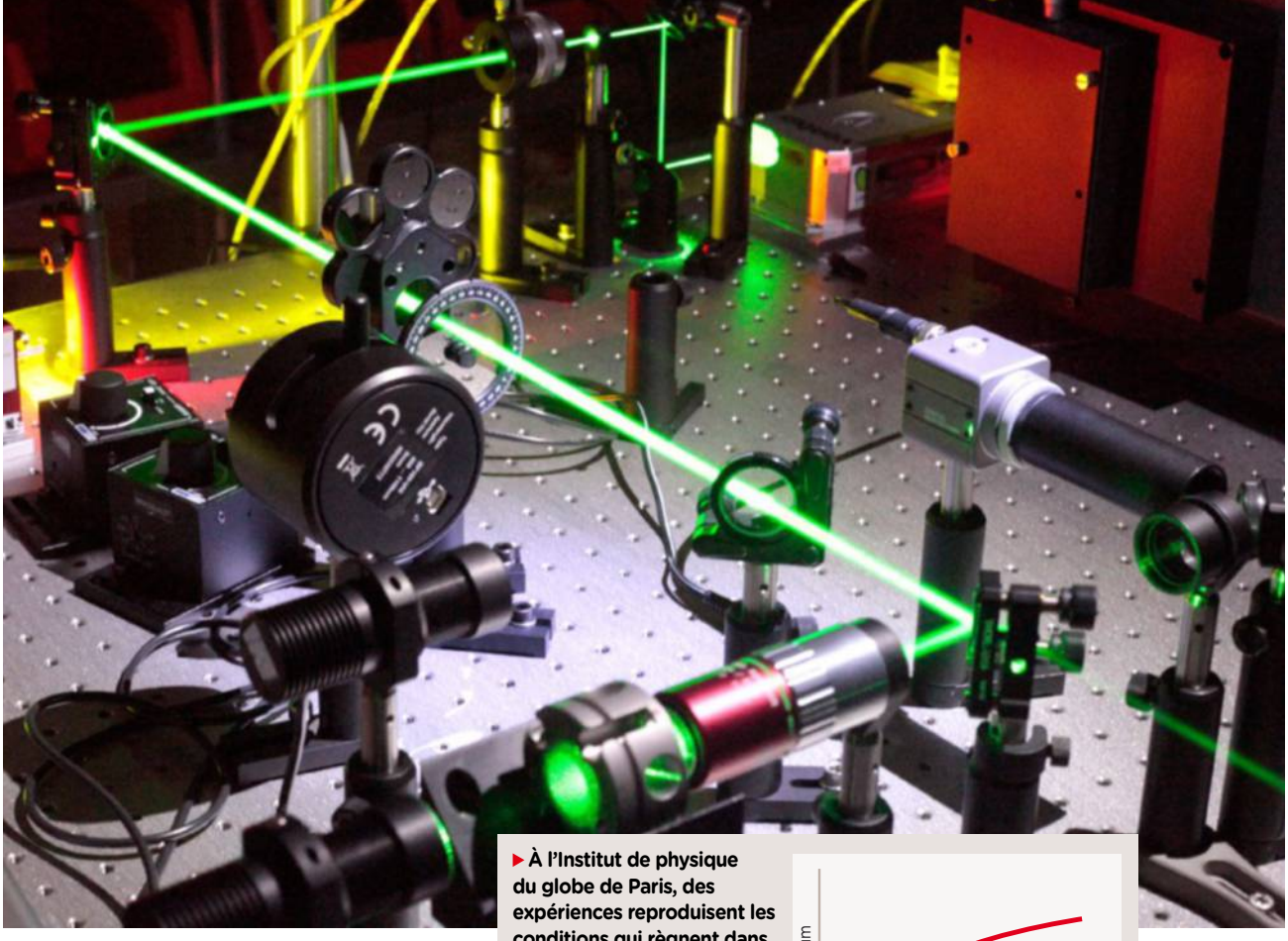
La structuration de la Terre en deux zones principales – un noyau métallique essentiellement composé de fer et de nickel au centre, et un manteau de silicate au-dessus – s'est produite dès la formation de notre planète, il y 4,5 milliards d'années. La Terre est à l'époque très chaude. Au cours du temps, elle se refroidit et son noyau métallique aussi : ce refroidissement crée des mouvements dans le noyau liquide baptisés convection. Toutefois, cette convection « naturelle » n'est pas suffisante pour engendrer une dynamo.

Pour que la dynamo fonctionne, il faut qu'un autre phénomène se produise : la cristallisation de la graine métallique. À mesure que la Terre refroidit, le noyau liquide se transforme en solide qui grossit progressivement. Mais le noyau n'est pas uniquement formé de fer et de nickel : il contient aussi des éléments légers. Même si on ne sait pas exactement lesquels et en quelle proportion, on a de fortes présomptions sur la présence de silicium, d'oxygène, de soufre et éventuellement de carbone. Or ces éléments ne cristallisent pas : ils sont rejetés à la frontière entre la graine et le noyau, et viennent enrichir le fer liquide. Ce liquide moins dense a alors tendance à monter. C'est ce mouvement qui crée une convection, dite solutale. Cette convection engendre l'énergie qui permet le fonctionnement de la dynamo et la génération du champ magnétique. *« On connaît bien les équations d'évolution de ce mécanisme,* précise Stéphane Labrosse, professeur à l'École normale supérieure de Lyon, *de sorte que l'on peut établir quel est le taux de croissance minimum de la graine pour maintenir un champ magnétique par effet dynamo. »* De fait, aujourd'hui, ce mécanisme explique correctement la génération du champ magnétique. Le problème survient quand on remonte dans le passé.

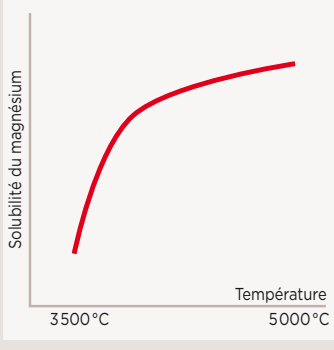
EXCÈS DE MAGNÉSIUM

Quel est l'âge du champ magnétique terrestre ? Les géophysiciens s'accordent à l'évaluer à au moins 3 milliards d'années grâce à l'étude de l'aimantation des roches anciennes. En se refroidissant, les roches magmatiques enregistrent en effet le champ de l'époque où elles se forment, autrement dit, elles « piègent » le champ magnétique du passé. Ce sont donc de véritables archives magnétiques (lire p. 36). Reste à trouver des roches anciennes contenant suffisamment de minéraux magnétiques pour que cet enregistrement ancien soit mesurable. En 2010, l'équipe de John Tarduno, de l'université de Rochester, dans l'État de New York, a détecté le faible champ résiduel dans des échantillons de laves volcaniques formées il y 3,5 milliards d'années (2). Dans un article récent, cette même équipe a également annoncé avoir détecté un champ magnétique résiduel dans des inclusions de magnétite – un minéral magnétique – dans des zircons datant de 4,2 milliards d'années (3).

Le problème est que le mécanisme de la dynamo par cristallisation décrit ci-dessus nécessite une graine, et tous les calculs indiquent que la Terre n'en comportait pas à ces époques reculées. *« En 2012, des calculs et des expériences de laboratoire ont permis de réévaluer la conductivité thermique du noyau liquide : elle est trois fois plus élevée que ce qu'on pensait auparavant* (4,5). *Or une conductivité thermique plus élevée entraîne une dissipation plus élevée également, de sorte que la vitesse de croissance de la graine est, elle aussi, plus*



▶ À l'Institut de physique du globe de Paris, des expériences reproduisent les conditions qui règnent dans le noyau : les échantillons de fer sont comprimés et chauffés. Les géophysiciens ont pu ainsi vérifier que la solubilité du magnésium augmente avec la température. Les détails de cette courbe sont à paraître dans *Nature*.



rapide qu'estimée auparavant. Pour cette raison, et compte tenu de la taille actuelle de la graine, tous les modèles aboutissent à un âge de moins d'un milliard d'années. Dès lors, comment expliquer un champ magnétique de plus de trois milliards d'années ? », s'interroge Stéphane Labrosse. C'est là qu'intervient l'idée de Dave Stevenson : si l'on ne peut pas obtenir de convection solutale par cristallisation de la graine, ne peut-on pas imaginer la présence en excès dans le noyau d'éléments légers qui joueraient le même rôle que les éléments qui précipitent lors de la cristallisation ? « *Quand le noyau liquide se refroidit, les éléments légers qui y sont dissous en excès vont précipiter et créer de la convection solutale. Autrement dit, ce serait le même type de phénomène que ce qui se produit aujourd'hui avec la cristallisation de la graine, mais sans graine* », précise James Badro, chercheur à l'Institut de physique du globe de Paris. Un élément lithophile en excès dans le noyau liquide va en effet s'exsolver, c'est-à-dire s'extraire, à mesure que le noyau refroidit… « *L'idée est que ce phénomène est contrôlé par la température : on part d'un noyau initialement très chaud qui contient beaucoup d'éléments solubles à haute température ; en se refroidissant, ces éléments deviennent moins solubles et ils s'exsolvent. C'est un peu ce qui se passe avec le CO_2 dans l'eau gazeuse : sous pression, le gaz est dissous dans l'eau (on ne voit pas les bulles dans la bouteille avant de l'ouvrir), et quand on ouvre la bouteille, la pression change et on exsolve le gaz qui s'échappe* », explique Stéphane Labrosse.

Si l'idée est séduisante, reste deux problèmes : quel élément léger pourrait convenir et comment imaginer qu'il puisse avoir été inclus dans le noyau liquide s'il n'aime pas y être ? Parmi les éléments légers présents dans le manteau – magnésium, aluminium et calcium –, le magnésium paraît le meilleur candidat : il est abondant – environ 40 % de la masse du manteau est constituée d'oxyde de magnésium (MgO) – et un excès d'un seul pour cent de magnésium dans le noyau liquide déclencherait l'exsolution nécessaire à la convection solutale mettant en marche la dynamo. Et si le magnésium n'aime pas •••

IPGP

UN RÔLE CLÉ DANS L'APPARITION DE LA VIE

C'est une sorte de machine à remonter le temps que propose d'utiliser une équipe d'astronomes en étudiant une étoile jeune qui ressemble en tout point au Soleil – notamment par sa masse –, mais d'un âge compris entre 500 millions et un milliard d'années. Autrement dit, cette étoile jeune, baptisée Kappa Ceti, est un soleil dans sa première jeunesse. À l'aide d'un instrument spécifique placé sur le télescope du pic du Midi, ces astronomes sont parvenus à mesurer le champ magnétique de l'étoile : il est dix fois plus intense que celui du Soleil actuel (1).

Partant de cette observation, ils ont modélisé le vent stellaire qui est 50 fois plus puissant que le vent solaire actuel. Et non seulement le vent de Kappa Ceti est fort, mais il connaît des bourrasques de 10 à 100 millions de fois plus puissantes que les éruptions solaires. *« En plaçant une planète ressemblant à la Terre dans ce système, nous avons constaté à l'aide de simulations que sa magnétosphère – son bouclier magnétique – était deux à trois fois moins étendue que la magnétosphère terrestre aujourd'hui*, explique Pascal Petit, astronome à l'observatoire de Midi-Pyrénées et coauteur de cette étude. *Comme sur la Terre lorsqu'elle était jeune, le spectacle des aurores polaires devait s'étendre beaucoup plus bas en latitude qu'elles ne le font à l'heure actuelle. »*

Quel est le lien entre champ magnétique et apparition de la vie ? Sur la Terre primitive, malgré une protection moindre du bouclier magnétique, la vie s'est tout de même développée. Et sans champ magnétique du tout ? Difficile à dire, mais il paraît clair que l'absence totale de champ magnétique finit par entraîner la disparition de l'atmosphère, érodée par le vent stellaire, comme c'est le cas actuellement sur Mars. Quant à Vénus, qui possède encore une atmosphère mais pas de champ magnétique, cette particularité résulte de sa forte activité géologique : l'atmosphère y est sans cesse renouvelée par les nombreux volcans qui la couvrent.

(1) J.-D. do Nascimento *et al.*, *MNRAS*, 2016.

••• rester dans le noyau à basse température, ce n'est plus le cas à haute température. Or à l'Hadéen, entre 4,5 milliards et 4,4 milliards d'années, la Terre en formation est très chaude, presque entièrement fondue. La séparation entre noyau et manteau se fait assez vite, et cette Terre primitive est constamment percutée par des objets, petits et gros, qui peuvent apporter du magnésium (Fig. 1).

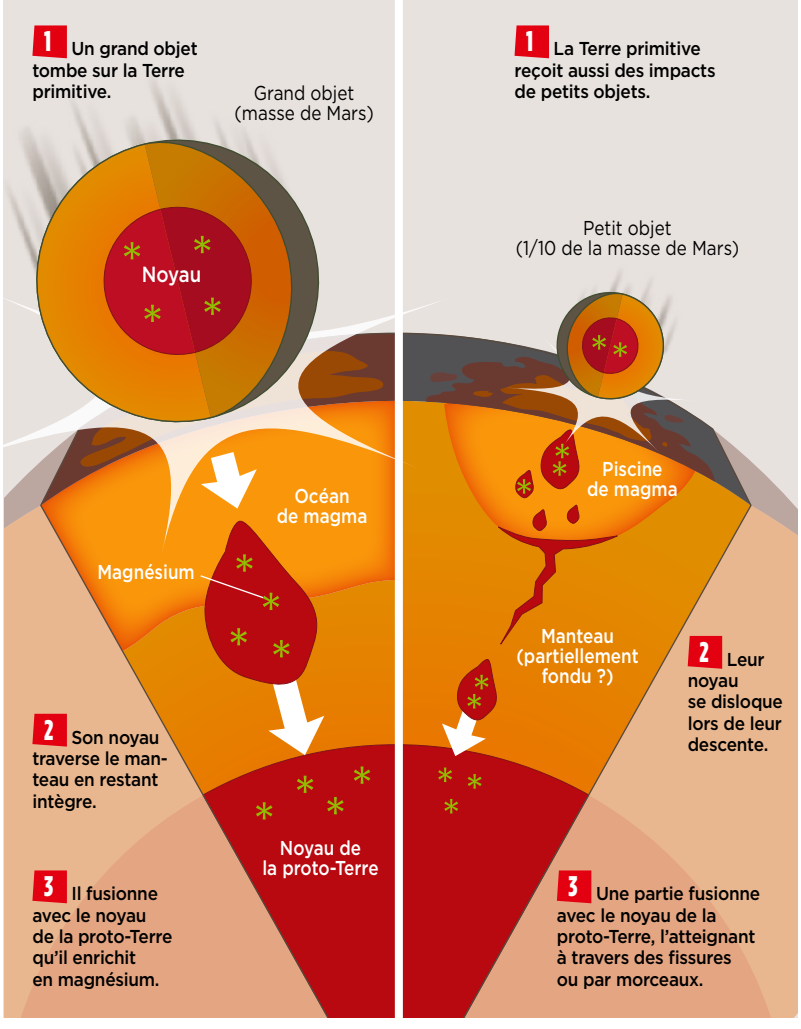
« Quand Dave Stevenson a proposé l'introduction de magnésium dans la Terre primitive comme déclencheur de mécanisme de la dynamo, les géophysiciens étaient assez dubitatifs. D'autant qu'on arrivait à faire fonctionner la dynamo sans cela.

> **“ L'oxyde de magnésium est si léger par rapport au reste du noyau que, quand il s'exsolve, il crée une énergie énorme ”**
>
> **James Badro,** chercheur à l'Institut de physique du globe de Paris

La révision de la conductivité thermique du noyau, dont on déduit que la graine est « jeune » – pas plus d'un milliard d'années – a changé la donne », confie Stéphane Labrosse. Ce désintérêt poli a perduré un moment. *« Moi-même, quand Stevenson disait qu'un pour cent de magnésium suffisait pour faire plus d'énergie que celle qui est dissipée par cristallisation, je n'y croyais pas. Puis en faisant les calculs, je me suis aperçu que c'était un mécanisme extrêmement puissant. L'oxyde de magnésium est tellement léger par rapport au reste du noyau que, quand il s'exsolve, il crée une énergie énorme »*, s'enthousiasme James Badro. Voulant en avoir le cœur net, ce dernier va alors tenter de mesurer la manière dont l'oxyde de magnésium se dissout en fonction de la température. Jusqu'à quelle quantité peut-on mettre du magnésium dans du fer à haute température ? Des expériences qui jusqu'ici n'avaient pas pu être faites en raison de leur difficulté. Mais seules ces données expérimentales permettent de valider ce scénario de fonctionnement de la dynamo.

Ces expériences visent à répliquer dans le laboratoire les conditions qui régnaient quand la Terre s'est formée. Des conditions de haute pression et de haute température, qui nécessitent l'utilisation de cellules à enclume de diamants (pour comprimer) et de lasers (pour chauffer l'échantillon). *« Dans la cellule à enclume de diamants, on fait un sandwich de métal et de silicates. On le comprime et on le chauffe jusqu'à 5 000 kelvins (4 700 °C environ). Puis on récupère l'échantillon par des méthodes de micro-usinage. Le résultat est une sorte de*

Fig. 1 L'enrichissement du noyau en magnésium


1 Un grand objet tombe sur la Terre primitive.
Grand objet (masse de Mars)
Noyau
Océan de magma
Magnésium
2 Son noyau traverse le manteau en restant intègre.
Noyau de la proto-Terre
3 Il fusionne avec le noyau de la proto-Terre qu'il enrichit en magnésium.
1 La Terre primitive reçoit aussi des impacts de petits objets.
Petit objet (1/10 de la masse de Mars)
Piscine de magma
Manteau (partiellement fondu ?)
2 Leur noyau se disloque lors de leur descente.
3 Une partie fusionne avec le noyau de la proto-Terre, l'atteignant à travers des fissures ou par morceaux.

micro-Terre avec au centre le noyau de métal et le silicate fondu, qui représente le manteau. C'est cette micro-Terre que l'on analyse », explique James Badro. Les mesures mettent des chiffres sur ce que l'on savait intuitivement : plus la température augmente, plus on dissout du magnésium (voir schéma p. 47). Dans son scénario, Stevenson devait supposer un modèle ad hoc d'exsolution du magnésium. Désormais, ces résultats, présentés en décembre 2015 à San Francisco lors de la réunion AGU de l'Union américaine de géophysique, précisent comment la concentration de magnésium change en fonction de la température (6).

Si le principe est maintenant bien établi, reste à inclure ces données dans des scénarios plus précis. Avec ces données et des modèles thermiques d'évolution du noyau, on peut évaluer comment la concentration en magnésium change en fonction du temps, d'où l'on pourra déduire l'énergie produite. *« Je suis en train d'ajouter ce terme dû au magnésium dans le bilan d'énergie et d'entropie de mon modèle thermique d'évolution du noyau »*, explique Stéphane Labrosse, spécialiste des modèles d'évolution thermique de la Terre. Ainsi, on pourra savoir combien de magnésium il faudrait précisément ajouter pour créer une dynamo magnétique dans ces temps reculés de l'histoire de la Terre. ■

(1) J. O'Rourke et D. Stevenson, *Nature, 529,* 387, 2016.
(2) J. Tarduno *et al., Science, 327,* 1238, 2010.
(3) J. Tarduno *et al., Science, 349,* 521, 2015.
(4) M. Pozzo *et al., Nature, 485,* 355, 2012.
(5) H. Gomi *et al., Phys. Earth Planet. Inter., 224,* 88, 2013.
(6) J. Badro, J. Siebert et F. Nimmo, AGU 2015.

Pour en savoir plus

Livres

■ Jean-Paul Poirier et Jean-Louis Le Mouël, *Une brève histoire du magnétisme*, Belin, 2013.

■ Ronald Merill, *Our Magnetic Earth,* The University of Chicago Press, 2010.

La Recherche a publié

■ Denis Delbecq, « Comment reproduire le champ magnétique terrestre », septembre 2015, p. 43.

■ Sacha Brun, « Simuler le champ magnétique du Soleil », février 2013, p. 60.

Sur le Web

■ **tinyurl.com/ipgp-geomag**
La page de l'équipe de géomagnétisme de l'Institut de physique du globe de Paris avec une introduction vidéo à leurs travaux.

■ **tinyurl.com/hg8pky6**
Simulation du renversement du champ magnétique

■ **tinyurl.com/canal-u-tv-espci**
Conférence sur l'origine du champ magnétique terrestre par les physiciens Emmanuel Dormy et Nicolas Mordant.

■ **tinyurl.com/conf-VKS**
Conférence de François Daviaud sur l'expérience de dynamo VKS qui vise à reproduire une dynamo magnétique au laboratoire.

■ **tinyurl.com/tempetes-magnetiques**
Vidéo de 7 minutes sur la survenue et les conséquences des tempêtes magnétiques par l'Institut d'études géologiques américain (USGS).

■ **http://tinyurl.com/za5u5k5**
Documentaire de vingt-cinq minutes sur les champs magnétiques et planétaires.

Articles de revues

■ Peter Olson et Hagay Amit, *Changes in earth's dipole, Naturwissenschaften, 93,* 519, 2006.

■ Gary Glatzmaier *et al., Modeling the Earth's Dynamo, in The State of the Planet : Frontiers and Challenges in Geophysics,* AGU, doi:10.1029/150GM03, 2013.

INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS D'APRÈS FRANCIS NIMMO

La vague qui a submergé la région de Sendai le 11 mars 2011 a atteint par endroits 15 mètres de haut.

Biologie P. 55 | Tchernobyl P. 62 | Épidémiologie P. 69

Archéologie

Le tsunami de Fukushima, un scénario qui se répète

Le raz de marée qui a frappé le Japon le 11 mars 2011 a étonné tout le monde, sauf les spécialistes de l'Antiquité japonaise, qui connaissaient le passé mouvementé de cette zone.

Rafaële Brillaud, journaliste, envoyée spéciale près de Minamisôma, dans le département de Fukushima

Le site historique national d'Urajiri est perché sur une colline du département de Fukushima avec vue sur l'océan Pacifique. Ce relief de 20 mètres est en réalité une accumulation de coquilles, restes des repas pris par des humains durant la phase moyenne de la période Jômon, qui se situe entre 3500 et 2000 avant notre ère. *«De nombreux amas coquilliers ont été mis au jour au Japon, mais celui-ci offre la documentation la plus complète sur la vie de l'époque dans la région»,* explique Yoshio Kikuchi, protohistorien et professeur à l'université de Fukushima.

Le chantier a brutalement été interrompu le 11 mars 2011. *« Les archéologues y travaillaient quand la vague, venue du front de mer 500 mètres plus loin, est venue buter sur la colline»,* raconte Yoshio Kikuchi. Elle a épargné les hommes mais a emporté les quelque 150 bâtiments en contrebas. Des bâches bleues recouvrent désormais les fouilles, à l'arrêt. *«La radioactivité est pour l'instant trop élevée pour retourner y travailler.»*

Au Japon, plus de cinq ans après, les stigmates de la triple catastrophe sont encore visibles. Le séisme de magnitude 9, puis le mur d'eau de 15 mètres de haut qui a notamment submergé les groupes électrogènes de la centrale de Fukushima Daiichi et provoqué un accident nucléaire, sont bien sûr un drame humain, qui a fait près de 18500 morts ou disparus. Mais Laurent Nespoulous, docteur en archéologie à la maison franco-japonaise à Tokyo, relève d'autres *«victimes»,* dont *«la perte n'est peut-être pas ressentie de prime abord mais s'impose durement aux populations dans le moyen et le long terme.»* Le patrimoine culturel de la zone sinistrée est en effet en déshérence. Le sillage de destruction fut si grand que les autorités responsables de son sauvetage et de sa gestion furent *«dépassées»,* précise le maître de conférences à l'Institut national des langues et civilisations orientales à Paris. Dans le seul département de Fukushima, on dénombre ainsi pas moins de 295 biens culturels répertoriés qui ont été endommagés ou détruits, sans compter les centaines d'autres qui ne bénéficient d'aucun classement. De plus, des sites historiques nationaux sont désormais •••

Repères

- **La région de Fukushima a connu par le passé d'importants séismes et tsunamis. En atteste une chronique de l'époque antique, au Japon, et des analyses de sédiments.**
- **Des fouilles préventives réalisées sur les terres contaminées fournissent une multitude de données qui confirment les textes.**
- **Dans le seul département de Fukushima, 295 biens culturels répertoriés ont été endommagés ou détruits à la suite de la catastrophe du 11 mars 2011.**

HANDOUT / REUTERS - AFP PHOTO / JIJI PRESS - HANDOUT / REUTERS X2

••• inaccessibles. Telle la tombe à décors rupestres de Kiyotosaku et sa chambre funéraire peinte, datées de la première moitié du VII[e] siècle. Situées dans le district de Futaba, soit en pleine zone interdite à trois kilomètres de Fukushima Daiichi, elles ne peuvent plus être entretenues, et leur accès est envahi par la végétation. Tel encore l'amas coquillier d'Urajiri, où Yoshio Kikuchi doit se frayer un chemin à travers les hautes herbes pour nous le présenter.

L'homme, qui fait partie du comité scientifique d'expertise des fouilles archéologiques dans le nord-est de l'archipel, appelle donc depuis plusieurs mois à la réalisation d'un *« musée des désastres »* dans le département de Fukushima (1). Un bâtiment dédié à la sauvegarde et à la mise en valeur de tous les biens culturels touchés par les conséquences du 11 mars. Il défendra ce projet en août prochain, lors du 8[e] congrès mondial de l'archéologie qui se tiendra à Kyoto (2).

DES CATACLYSMES OUBLIÉS

Ce musée est d'autant plus important qu'il affiche une autre ambition : celle d'être un lieu de mémoire, de préservation et de transmission des informations liées au désastre, dans l'espoir que les futures générations n'oublient jamais ce qui s'est passé dans le Tohoku. Car la vague de 2011 soulève un problème majeur. Il est fréquent d'entendre dire que l'ampleur de la catastrophe était imprévisible. Le séisme était d'une magnitude sans précédent, le tsunami d'une puissance inconnue jusqu'alors. L'homme n'aurait donc pas pu s'attendre à une telle colère de la nature. Un avis loin d'être partagé par les archéologues. *« Tous les spécialistes de l'Antiquité le savaient »*, assène Yoshio Kikuchi : des cataclysmes de cette ampleur avaient déjà eu lieu par le passé, et ce précisément dans la même région. Les annales officielles témoignent de ces calamités régulières. La sixième et dernière des chroniques de l'époque antique, qui couvrent les règnes des souverains de 858 à 887, mentionne notamment un tremblement de terre, qui a frappé l'actuelle région de Sendai. *« Il y est relaté que, dans la province de Michinoku, le 26[e] jour de la 5[e] lune de la 2[e] année de l'ère Jôgan (le 13 juillet 869), un séisme extrêmement violent, auquel succède un très puissant tsunami, vient dévaster la région »*, précise Laurent Nespoulous. Le pouvoir local était alors à Taga, à trois kilomètres à l'intérieur des terres depuis la baie de Matsushima. La mer s'est soudain engouffrée jusque-là. *« Les chroniques rapportent des scènes de destruction et de panique. Les cours d'eau remontent leur lit, guidant le passage à un raz de marée qui va terminer sa course et s'écraser au pied du relief qui accueillait l'administration provinciale. »* Or ces éléments se superposent parfaitement à ce que la même région a subi en 2011 (Fig. 1). Comment l'homme a-t-il donc pu oublier un tel traumatisme de son passé et se laisser surprendre par sa répétition ?

Le bus traverse le village d'Odaka, à une vingtaine de kilomètres au nord de la centrale. Le paysage se réduit à une ligne d'horizon infinie, seulement troublée par l'ombre de rares carcasses de voitures ou de maisons déchiquetées. Odaka est une ancienne lagune, recouverte de terre il y a une centaine d'années pour permettre les cultures. Le tsunami a fait table rase de tout cela et la lagune réapparaît par endroits. Les sols, chargés de sel et tassés sous la phénoménale pression de l'eau, sont devenus impropres à la construction comme à l'agriculture. Il faut partir vivre ailleurs.

Plus au nord, près de Minamisôma, dans une zone moins contaminée par la radioactivité, une soixantaine de personnes dont onze archéologues s'activent sur la colline boisée de Tenkazawa. *« Ce relief n'existera bientôt plus »*, déclare Yoshio Kikuchi. Un peu partout dans la région, c'est le même scénario. On arase la terre meuble pour la transporter près des côtes et refaçonner le littoral, comme à Odaka. On construit des

Sur le site de Higashimachi, en mai 2014, des fouilles préventives sont réalisées avant la construction de maisons destinées aux populations chassées par le tsunami. C'est ainsi que l'on découvre les traces de ceux qui sont venus s'installer au même endroit, pour les mêmes raisons, plus de 1100 ans auparavant.

LAURENT NESPOULOUS

habitations pour relocaliser les populations touchées par le tsunami. Au préalable, des fouilles préventives sont menées tambour battant. Des milliers de sites sont ainsi explorés de front, des archéologues de tout l'archipel sont venus prêter main-forte. Dans la hâte, de belles découvertes sont parfois réalisées. À Tenkazawa, ce sont des installations antiques et médiévales en rapport avec la métallurgie intensive des époques de Nara et Heian qui ont été mises au jour.

DES INDICES DANS LE SOL

Ces fouilles préventives fournissent aussi, par petites touches, une multitude de données qui confirment ce que les textes disaient déjà. Les populations côtières qui partent vivre plus en amont à l'intérieur des terres à la suite du tsunami de 2011 s'installent précisément là où vivaient leurs ancêtres chassés par… le tsunami de 869. Les hommes sont donc peu à peu revenus s'établir au bord de l'océan, dans l'oubli des catastrophes de l'ère Jôgan. *«Certes,* reconnaît Laurent Nespoulous, *le cataclysme du 11 mars 2011 n'aurait pu être évité. On ne peut toutefois s'empêcher de penser que ses conséquences humaines et industrielles auraient sans doute pu être minorées, si l'on avait pris en compte le "passif" de la région à la lumière des textes légués par l'Histoire.»*

Des indices avaient pourtant peu à peu refait surface. Les médias ont montré, après 2011, les travaux précurseurs de deux universitaires, Koji Minoura et Masanobu Shishikura. Le premier est géologue à l'université du Tohoku, à Sendai. La plaine de cette métropole, capitale du département de Miyagi, au nord de celui de Fukushima, regorge de lieux de légendes faisant état de vieux tsunamis. Koji Minoura est intrigué par un ancien poème, évoquant le mont Sue-no-Matsuyama épargné par un tsunami géant. Il décide d'analyser les sédiments près de Sendai, dans la plaine côtière de Soma, et remarque une couche claire, caractéristique des sédiments marins, qui contraste avec le sol gris noir.

Dans un article publié en 2001 (3), Koji Minoura estime que le tsunami de 869 a été provoqué par un séisme de magnitude 8,3 et que le raz de marée se serait répandu sur plus de 4 kilomètres. Il évoque la présence de traces de trois tsunamis gigantesques intervenus sur les trois mille dernières années, ce qui l'amène à déduire une récurrence de ces cataclysmes de 800 ou 1 100 ans. *«Un tsunami similaire à celui de l'ère Jôgan pourrait inonder la plaine côtière sur 2,5 ou 3 kilomètres»*, conclut-il de manière prémonitoire.

Masanobu Shishikura est, lui, paléosismologue à l'Institut national de la science et des technologies industrielles avancées à Tsukuba, au nord de Tokyo. Il cumule échantillons de sol et analyses des archives pour étudier les catastrophes anciennes. Une discipline plutôt jeune, jugée «mineure» par ses collègues. À partir de prélèvements dans le Tohoku, il conclut que la région a été régulièrement touchée par de gros tremblements de terre sur un cycle de 500 ou 1 000 ans.

En 2011, Masanobu Shishikura s'apprêtait à en avertir les autorités du département de Fukushima. Il devait les rencontrer le… 23 mars. *«Nous aurions pu sauver des vies si le tsunami était survenu un mois plus tard»*, se lamente-t-il. Avec ses équipes, le paléosismologue a aussi réalisé une carte des zones noyées par le tsunami de 869 qu'il pensait distribuer aux résidents le long de •••

Fig. 1 Deux tsunamis presque identiques

▲ **La ligne représentant l'inondation provoquée par le tsunami de mars 2011 épouse presque parfaitement celle du tsunami de 869.**

INFOGRAPHIE : SYLVIE DESSERT

Cette paroi peinte est située dans la chambre funéraire de Kiyotosaku. Ce site du VII^e siècle se trouve en pleine zone interdite, à 3 kilomètres de Fukushima Daiichi. Toute entretien y est donc désormais impossible.

LAURENT NESPOULOUS

••• la côte. La carte s'est avérée quasiment identique à celle du tsunami de 2011.

Les travaux de Koji Minoura et Masanobu Shishikura, publiés en anglais, ne sont pas les seuls à évoquer les désastres ancestraux. Laurent Nespoulous a trouvé des études plus anciennes encore en faisant mention. Dans les années 1980, lors de fouilles sur le site de Taga, des rapports évoquent l'effort de reconstruction après le désastre. Surtout, un article de 1990, combinant archéologie et sédimentologie, révèle que la vague atteignait encore 2,5 ou 3 mètres au niveau de Taga, suggérant un tsunami largement supérieur au moment de toucher la côte (4). *« Cette étude,* souligne Laurent Nespoulous, *fut réalisée par des experts de l'électricien Tohoku Electric Power Company, attachés au bureau de construction de la centrale nucléaire d'Onagawa, près de Sendai. »* Sur la base de ces recherches, les réacteurs d'Onagawa bénéficièrent d'une digue de près de 9 mètres de hauteur quand ceux de Fukushima Daiichi, un peu plus au sud, n'opposaient à l'océan qu'une protection de 5 mètres… Les signes avant-coureurs ne manquaient donc pas. Mais, pour diverses raisons, ils n'ont pas été pris en compte. Fukushima pose ainsi une question primordiale : comment réparer les perturbations de la transmission des connaissances au cours du temps ? Le Japon est l'un des pays au monde les mieux préparés à l'éventualité d'un séisme. Mais tandis que l'archipel est sous haute surveillance, aucune prévision n'a permis d'anticiper le drame de 2011.

Les experts, on le sait, étaient tous persuadés qu'un séisme de magnitude 9 ne pouvait avoir lieu au large de Sendai. Ils en attendaient un plus au sud – et l'attendent toujours d'ailleurs. Leurs prédictions se fondaient principalement sur la surveillance des mouvements de la croûte terrestre, une science qui ne dispose de données que sur un siècle à peine. Aveuglés par une mémoire trop courte, confortés par des théories qui ont volé en éclats avec le séisme du Tohoku, ils n'ont pas prêté suffisamment attention aux documents historiques et aux découvertes des géologues. Les pouvoirs publics n'ont pas non plus pris le relais, en accordant par exemple des crédits de recherche à des travaux de fond sur le sujet.

BONNES RÉSOLUTIONS

La faute est partagée. *« Les archéologues ne cherchent pas au petit bonheur la chance,* reconnaît Laurent Nespoulous. *On ne trouve que ce que l'on s'attend à trouver, ce que l'on est préparé à comprendre. »* Le séisme de Kobe en 1995 avait déjà révélé l'importance de la mise en valeur des séismes passés. *« Cette archéologie des désastres s'est beaucoup développée à partir des années 2000,* rappelle Yoshio Kikuchi, *mais personne n'a eu l'idée de la pratiquer dans le Tohoku. »* Il faut désormais s'y atteler avec ferveur, affirme ce spécialiste de la période Kofun, du nom des tumuli ou monuments funéraires protohistoriques japonais édifiés entre les III^e et VII^e siècles. Reprendre tous les rapports pour examiner les coupes stratigraphiques et, sur les chantiers de fouilles, rechercher systématiquement les traces des cataclysmes anciens.

Dans la communauté scientifique nippone, une lente prise de conscience s'opère. On commence à parler d'interdisciplinarité, sans forcément la mettre encore en pratique. Et, en février, l'Institut de recherche sismique de l'université de Tokyo a ouvert au concours un poste pour une personne capable de déchiffrer les archives historiques sur les séismes et les volcans. Un changement de paradigme jugé *« sans précédent »* par la presse japonaise. Le temps, seul, mettra à l'épreuve ces nouvelles résolutions. ■

(1) Y. Kikuchi *et al., Ebisu, 52,* 47, 2015.

(2) N. Schlanger *et al., Antiquity,* 2016 (sous presse).

(3) K. Minoura *et al., Journal of Natural Disaster Science, 23,* 83, 2001.

(4) H. Abe *et al., Journal of the Seismological Society of Japan, Second Series, 43,* 513, 1990.

Des bactéries programmées pour détecter les maladies

Les progrès de la biologie synthétique permettront dans un futur proche de « reprogrammer » des cellules vivantes pour diagnostiquer et traiter des maladies.

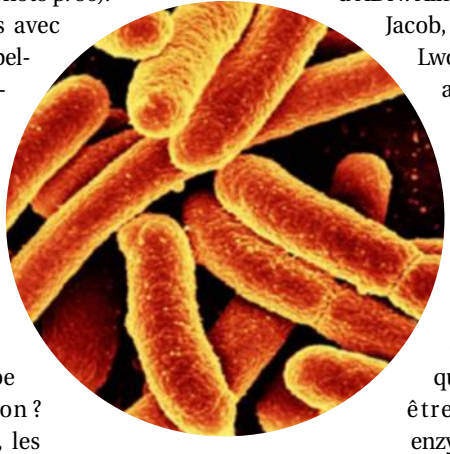
Jérôme Bonnet, bio-ingénieur

Imaginez un yaourt dans lequel des bactéries sont capables de traiter les maladies inflammatoires de l'intestin… Ou bien des cellules de votre système immunitaire reprogrammées pour détecter et détruire des cellules cancéreuses. De la science-fiction ? Non ! Ces outils feront probablement bientôt partie de notre quotidien. Ils descendent d'une longue lignée d'« organismes sentinelles », tel le canari utilisé dans les mines de charbon, et dont la mort signalait aux mineurs une fuite de gaz et l'urgence d'évacuer. De même, les rosiers, plus sensibles que la vigne au champignon de l'oïdium, permettent au vigneron de traiter à temps sa plantation (voir photo p. 56).

Récemment, nous avons avec d'autres équipes de Montpellier déjà réussi à transformer des bactéries non pathogènes de l'espèce *Escherichia coli* en « détecteurs » capables de signaler la présence anormale de glucose dans les urines de patients diabétiques (1).

Sur quoi repose le principe de cette transformation ? Modelés par l'évolution, les micro-organismes tels que nos cellules ou les bactéries sont de véritables (nano) machines fonctionnant de manière autonome. Ils sont capables d'analyser leur état interne ou leur environnement et de produire une réponse adéquate. Par exemple, les bactéries peuvent s'adapter à l'absence de glucose et à la présence de lactose dans leur environnement. Le glucose est la principale source d'énergie des bactéries. Mais en l'absence de ce dernier, elles peuvent utiliser le lactose s'il est présent. Pour cela, des gènes qui codent des protéines permettant d'importer et de métaboliser les molécules de lactose sont activés. Lorsque le glucose est de nouveau dans l'environnement de la bactérie, ces gènes sont alors inhibés. Cette régulation de l'activité génétique se produit grâce à des interactions entre des protéines et des séquences d'ADN. Ainsi, les biologistes François Jacob, Jacques Monod et André Lwolf ont démontré dans les années 1960 chez *Escherichia coli* que les gènes codant les enzymes nécessaires à l'utilisation du lactose étaient sous le contrôle d'autres séquences ADN.

Quel est leur rôle ? Pour qu'une protéine soit fabriquée, le gène qui la code doit être transcrit par une enzyme (*), l'ARN polymérase. Cette enzyme se fixe sur l'ADN juste en amont du gène codant, sur une séquence appelée « promoteur ». Une fois •••



PASIEKA/SPL/COSMOS

▲ *On peut désormais programmer des bactéries, comme ici* Escherichia coli *pour leur faire jouer un rôle de détecteur.*

Repères

- **Les cellules vivantes sont comme des nanomachines sous le contrôle de « programmes » biologiques.**
- **Des chercheurs ont conçu l'équivalent biologique d'un transistor qui, comme dans les systèmes électroniques, peut contrôler l'expression des gènes d'une cellule.**
- **Des chercheurs de Montpellier ont réussi à transformer des bactéries en « détecteurs » capables de signaler la présence anormale de glucose dans les urines de diabétiques.**

(*) **Une enzyme** est une protéine qui active ou accélère des réactions chimiques dans une cellule.

▲ *Ce rosier « sentinelle » sera le premier touché en cas d'attaque d'oïdium. La vigne pourra alors être traitée de manière préventive.*

••• fixée, l'enzyme se déplace et effectue la transcription du gène codant. Mais le déplacement de l'ARN polymérase peut être bloqué par la présence d'une molécule qui se fixe entre le promoteur et le gène codant. C'est ce qui se produit chez la bactérie en présence de glucose. Un gène dit « régulateur » produit une protéine qui bloque l'ARN polymérase en amont des gènes codant les protéines nécessaires à l'utilisation du lactose (Fig. 1). Cette protéine est appelée « répresseur lactose ». Mais si le glucose disparaît et que le lactose est présent, le répresseur lactose se détache de l'ADN. L'ARN polymérase peut alors transcrire les gènes codant les protéines nécessaires à l'utilisation du lactose. Ce système naturel est comparable à un interrupteur moléculaire : les gènes pour le lactose sont « allumés » ou « éteints » en fonction de l'environnement de la bactérie. Ce système de régulation des gènes, baptisé « opéron lactose », permet à la bactérie de faire une économie d'énergie substantielle, car elle produit les enzymes requises uniquement lorsque cela est nécessaire.

L'opéron lactose n'est pas le seul système de contrôle biologique. La plupart des fonctions bactériennes (ou cellulaires) peuvent être assimilées à des « programmes » biologiques. Ces programmes sont encodés dans de véritables « circuits » constitués de réseaux de molécules biologiques. Ces circuits biologiques présentent des similitudes frappantes avec les circuits électroniques : l'état des gènes, allumés ou éteints, autrement dit « on » ou « off », est comparable au code binaire, les 0 et les 1 utilisés en électronique.

Récemment, nous avons fabriqué l'équivalent biologique du transistor avec une séquence particulière d'ADN

Suivant ces principes, il est donc tentant de « reprogrammer » les cellules, pour leur donner de nouvelles fonctions, en élaborant de nouveaux circuits biologiques, et en s'inspirant si possible des algorithmes couramment utilisés en électronique.

Comment réaliser un circuit biologique artificiel ? Pour mieux comprendre la transposition de principes issus de l'électronique en biologie, voyons d'abord comment fonctionnent les circuits électroniques. Un des éléments centraux des systèmes électroniques modernes est le transistor. Ce dernier peut à la fois jouer le rôle d'amplificateur, mais aussi d'interrupteur permettant de contrôler le passage du courant électrique.

Récemment, nous avons fabriqué l'équivalent biologique du transistor, appelé « le transcriptor ». Pour composer cet interrupteur, nous n'avons pas utilisé de molécule capable de se fixer à l'ADN comme le fait le répresseur lactose. Nous avons choisi une séquence particulière d'ADN, un terminateur de transcription (Fig. 2). Il s'agit d'une séquence qui bloque le passage de l'ARN polymérase. Précision importante, ce terminateur ne stoppe l'enzyme que dans une direction. Si sa séquence est inversée, il laisse passer l'ARN polymérase le long de l'ADN, et la transcription s'opère. Pour le retourner, nous avons recours à des enzymes, appelées intégrases. Elles sont capables de reconnaître spécifiquement deux courtes séquences uniques d'ADN, appelées « sites de recombinaison », et d'inverser la portion d'ADN située entre ces deux sites. Il suffit donc d'encadrer le terminateur de transcription par deux sites de recombinaison pour que celui-ci puisse être retourné. L'ensemble fonctionne alors comme un interrupteur (2).

« COURANT » BIOLOGIQUE

Dans nos expériences, nous avons inséré ce transcriptor entre un gène promoteur, le gène sur lequel se fixe l'ARN polymérase, et un gène codant une protéine fluorescente. En l'absence d'intégrase, le terminateur du transcriptor bloque le passage de l'ARN polymérase et la transcription du gène situé en aval. Mais en présence d'intégrase, le terminateur est inversé. Cela permet à l'ARN polymérase de passer et de transcrire le gène codant. La protéine est synthétisée et la bactérie devient fluorescente (Fig. 3). On le voit, l'inversion du terminateur permet d'activer ou de désactiver l'expression des gènes en réponse à différents signaux à partir du moment où ils contrôlent la production d'intégrase par la bactérie. Le transcriptor fonctionne comme un « interrupteur génétique ». En lieu et place du courant électrique, le transcriptor contrôle le « courant » biologique représenté par le flux d'ARN polymérase le long de l'ADN. De plus, la réaction d'inversion du terminateur est irréversible. La bactérie garde dans son génome la marque de cette inversion. L'événement •••

BIOSPHOTO / CLAUDE THOUVENIN

Fig. 1 L'opéron lactose, un interrupteur génétique naturel

Pour se nourrir, la bactérie peut s'adapter à la présence de glucose ou de lactose

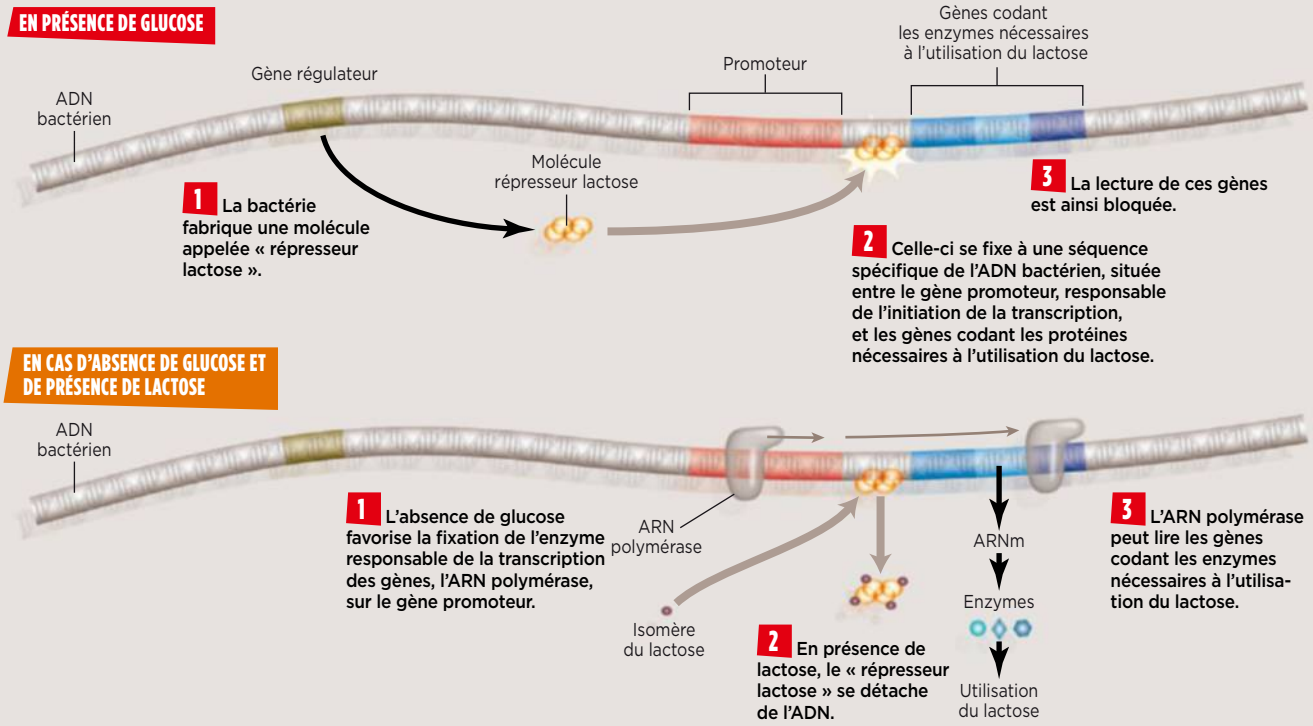
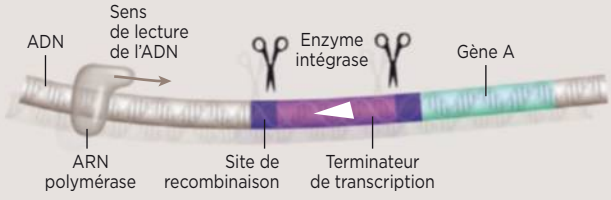
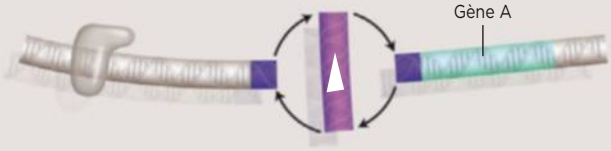

EN PRÉSENCE DE GLUCOSE
ADN bactérien
Gène régulateur
Promoteur
Gènes codant les enzymes nécessaires à l'utilisation du lactose
Molécule répresseur lactose
1 La bactérie fabrique une molécule appelée « répresseur lactose ».
2 Celle-ci se fixe à une séquence spécifique de l'ADN bactérien, située entre le gène promoteur, responsable de l'initiation de la transcription, et les gènes codant les protéines nécessaires à l'utilisation du lactose.
3 La lecture de ces gènes est ainsi bloquée.
EN CAS D'ABSENCE DE GLUCOSE ET DE PRÉSENCE DE LACTOSE
ADN bactérien
1 L'absence de glucose favorise la fixation de l'enzyme responsable de la transcription des gènes, l'ARN polymérase, sur le gène promoteur.
ARN polymérase
Isomère du lactose
2 En présence de lactose, le « répresseur lactose » se détache de l'ADN.
ARNm
Enzymes
Utilisation du lactose
3 L'ARN polymérase peut lire les gènes codant les enzymes nécessaires à l'utilisation du lactose.

Fig. 2 Le principe du transcriptor

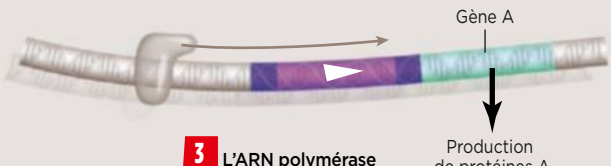
Le transcriptor est un interrupteur génétique artificiel. Il est élaboré grâce à une séquence d'ADN qui contrôle le passage de l'ARN polymérase.



1 On place en amont du gène A un « interrupteur », une séquence qui bloque la transcription de ce gène par l'ARN polymérase. Cette séquence est encadrée par des sites de recombinaison, qui sont reconnus par des enzymes, appelées « intégrases ».



2 Les deux intégrases se fixent et coupent l'ADN. Elles inversent la séquence de blocage, ce qui permet le passage de l'ARN polymérase.



3 L'ARN polymérase transcrit le gène A.

4 Pour que l'interrupteur soit inversé, les biologistes peuvent insérer directement dans l'ADN bactérien les gènes codant l'intégrase, ou les mettre à disposition de la bactérie sous forme de plasmide (séquence autonome).

INFOGRAPHIE : SYLVIE DESSERT

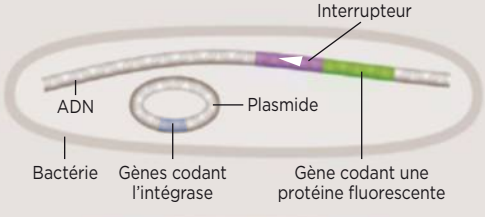
••• qui a déclenché l'inversion est mémorisé, même s'il est transitoire. Enfin, un signal très faible, suffisant pour produire l'intégrase, permet l'inversion et l'activation des gènes à un niveau très élevé : on obtient ainsi une amplification du signal, comme dans un transistor.

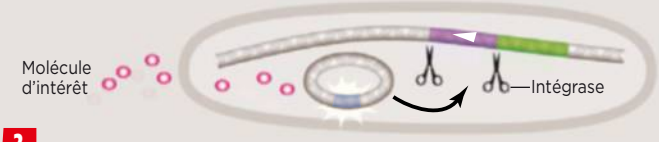
Exécuter un programme requiert cependant des fonctions plus complexes que celle du transistor. Un circuit reçoit un ou plusieurs signaux entrants, et produit un signal de sortie en fonction de la combinaison de ces signaux et d'une logique prédéfinie. En électronique, ce traitement des signaux est réalisé par des « portes logiques ». Les portes logiques sont construites par différents arrangements de plusieurs transistors. Tous les calculs effectués par les appareils électroniques que nous utilisons quotidiennement (ordinateurs, smartphones…) reposent sur l'utilisation de portes logiques à base de transistors. Par exemple, une porte logique « ET » ne produira un signal de sortie que si deux signaux entrants sont présents. Cette porte se construit en plaçant deux transistors en série. De la même manière, dans des bactéries in vivo, nous avons combiné plusieurs transcriptors pour concevoir des circuits génétiques remplissant la fonction de portes logiques (Fig. 4). Dans ce cas, un gène d'intérêt sera activé en réponse à des combinaisons particulières de molécules contrôlant la production d'intégrases. Par exemple, en utilisant une porte « ET » (AND), un gène rapporteur fluorescent sera produit uniquement si les deux molécules sont présentes alors qu'avec une porte « OU exclusive » (XOR), le gène sera produit uniquement quand l'une ou l'autre molécule signal est présente (voir photo p. 59).

Fig. 3 Transformer une bactérie en détecteur

En présence de la molécule recherchée dite d'intérêt, la bactérie devient fluorescente

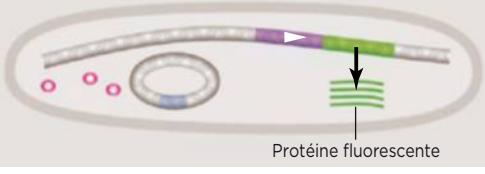
1 Les biologistes insèrent dans l'ADN bactérien un gène codant une protéine fluorescente sous le contrôle d'un transcriptor. Ils insèrent également un plasmide portant les gènes codant l'intégrase, qui s'active avec la présence d'une molécule d'intérêt.





2 Si la bactérie est en présence de la molécule d'intérêt, les gènes du plasmide sont activés et produisent l'intégrase. Les intégrases vont se fixer sur l'interrupteur, et le retourner.

3 La bactérie produit ainsi des protéines fluorescentes attestant la présence de la molécule d'intérêt.



ALGORITHME MÉDICAL

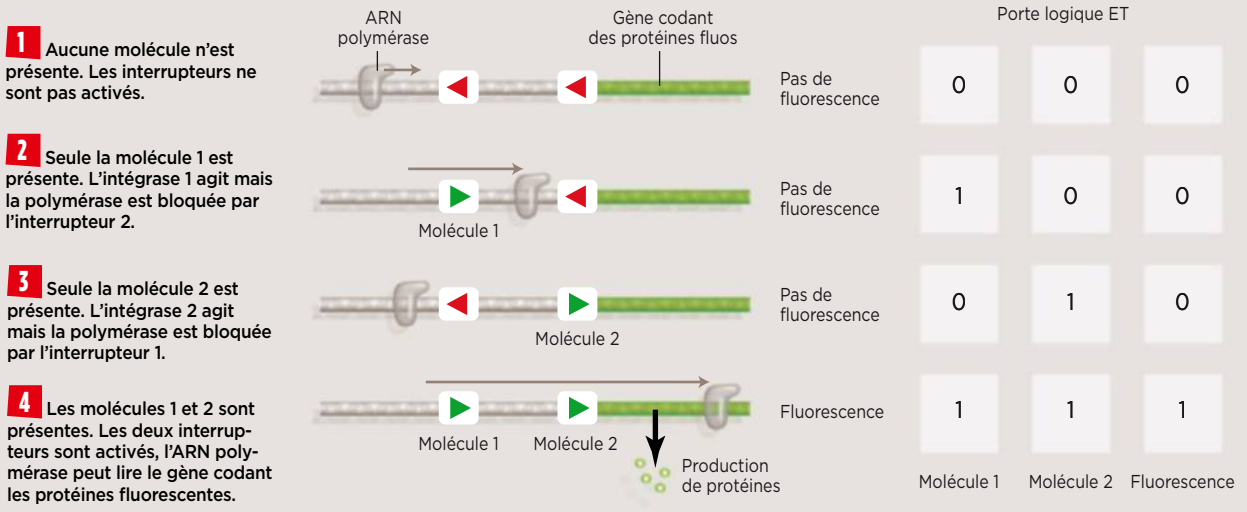
À partir de ces principes, nous avons choisi de concevoir des circuits biologiques artificiels intégrés dans des bactéries et applicables au diagnostic médical. De nombreuses pathologies sont diagnostiquées de manière fiable en évaluant une combinaison de plusieurs biomarqueurs. Il est donc nécessaire non seulement de détecter plusieurs molécules à la fois, mais ensuite d'identifier une combinaison spécifique de biomarqueurs associée à l'état pathologique, autrement dit d'effectuer une analyse impliquant ce que l'on peut appeler un algorithme médical. Les systèmes transcriptor/portes logiques sont particulièrement adaptés à cette problématique, permettant d'une part d'amplifier des signaux de biomarqueurs présents à faible concentration, et d'autre part d'implanter dans la cellule un algorithme spécifique conduisant à la production de signal uniquement pour certaines combinaisons de biomarqueurs associés à un état pathologique. Enfin, la capacité de « mémoire » des systèmes à inversion d'ADN pourrait permettre de stocker les résultats du test diagnostic à long terme, par exemple pour effectuer des analyses décalées dans le temps.

Dans un premier temps, nous avons voulu établir la première preuve de concept d'une cellule vivante reprogrammée pour détecter des signaux cliniquement pertinents dans des échantillons humains comme le sang ou les urines. Ces derniers sont très complexes, ce qui complique la détection de signaux faibles. De plus, le mélange complexe de molécules peut interférer avec le système de détection : soit en inhibant son activité, soit au contraire en interagissant de manière non spécifique avec lui. Il produit alors des signaux faux-positifs. Nous avons tout d'abord

INFOGRAPHIES : SYLVIE DESSERT

Fig.4 Programmer une bactérie pour répondre à plusieurs signaux

Une bactérie peut produire des protéines fluorescentes lorsqu'elle est en présence de deux molécules. Le programme de fabrication de ces protéines obéit alors à la porte logique « ET », comme en électronique.


1 Aucune molécule n'est présente. Les interrupteurs ne sont pas activés.
2 Seule la molécule 1 est présente. L'intégrase 1 agit mais la polymérase est bloquée par l'interrupteur 2.
3 Seule la molécule 2 est présente. L'intégrase 2 agit mais la polymérase est bloquée par l'interrupteur 1.
4 Les molécules 1 et 2 sont présentes. Les deux interrupteurs sont activés, l'ARN polymérase peut lire le gène codant les protéines fluorescentes.
ARN polymérase
Gène codant des protéines fluos
Molécule 1
Molécule 2
Production de protéines
Porte logique ET
Pas de fluorescence
Pas de fluorescence
Pas de fluorescence
Fluorescence
0 0 0
1 0 0
0 1 0
1 1 1
Molécule 1
Molécule 2
Fluorescence

testé la fonctionnalité de nos systèmes de transistor biologique et de portes logiques dans des échantillons d'urine et de sang humains. Nous avons montré que les bactéries pouvaient survivre dans ces milieux complexes et que nos circuits génétiques synthétiques étaient capables d'opérer dans ces conditions.

Dans un deuxième temps, nous avons essayé d'utiliser nos bactéries modifiées pour détecter le glucose dans l'urine de patients diabétiques. Cette maladie est un problème majeur de santé publique touchant des millions de personnes dans le monde alors que plus de la moitié des diabétiques ne sont pas diagnostiqués. L'un des marqueurs de diabète non contrôlé est la présence anormale de glucose dans les urines. Nous avons donc utilisé un système bactérien répondant naturellement au glucose. Cependant, avec une approche classique (couplage du système naturel à un gène rapporteur), ce système produisait un signal très faible en présence de glucose et était inhibé par les échantillons cliniques. En couplant ce système de détection du glucose au « transcriptor », nous avons été capables de rendre son signal détectable. Ainsi, ces bactéries encapsulées dans des billes d'alginate changent de couleur lorsqu'elles sont plongées dans des urines contenant du glucose. Ces travaux constituent bien entendu une première étape (ce système ne remplacera pas les bandelettes urinaires). Mais ils démontrent que l'on peut utiliser des circuits génétiques synthétiques pour permettre à des bactéries de détecter des biomarqueurs cliniquement pertinents dans des échantillons cliniques humains. Nos travaux actuels visent à concevoir des systèmes permettant de détecter de nombreuses molécules d'intérêt, et à programmer les cellules pour identifier une combinaison de biomarqueurs associée à un état pathologique.

▲ *L'apparition d'une bactérie fluorescente traduit la présence de la molécule recherchée.*

MANIPULATION DU MICROBIOTE

Le champ des applications est immense. Pour les chercheurs, la construction de cellules synthétiques pourrait permettre d'explorer de nouveaux domaines de la connaissance, par exemple pour mieux comprendre les mécanismes essentiels de la vie. Pour les ingénieurs, la conception de •••

JÉRÔME BONNET

••• systèmes biologiques artificiels accomplissant de nouvelles fonctions « dictées » par l'homme promet de nombreuses applications dans la fabrication de médicaments, la production d'énergie, l'environnement et la santé.

Une des pistes les plus prometteuses dans le domaine médical est la manipulation de notre microbiote. Le microbiote est l'ensemble des bactéries qui sont présentes à la surface et à l'intérieur de notre corps : nous contenons presque autant de bactéries que de cellules humaines ! Ainsi, si les bactéries sont souvent perçues comme nos ennemis, elles sont avant tout nos alliées, accomplissant des fonctions essentielles dans notre organisme. La partie la plus connue du microbiote est la flore intestinale, véritable organe régissant de nombreuses fonctions digestives. De récents travaux ont suggéré que la flore intestinale agissait à d'autres niveaux, dans des phénomènes de maladies auto-immunes comme le diabète ou la maladie de Crohn, mais aussi sur le comportement. De plus, chaque individu possède une flore microbienne unique en fonction de son mode de vie, son alimentation, ou son patrimoine génétique. De par son importance capitale et sa diversité de fonction, l'ingénierie de la flore microbienne promet de révolutionner notre façon de prévenir, diagnostiquer et traiter les maladies.

La biologie synthétique promet de transformer des pans entiers de notre mode de vie. Restent quelques défis…

Nous l'avons vu, la biologie synthétique promet de transformer des pans entiers de notre mode de vie. Cependant, pour réaliser ses promesses, le domaine a devant lui de nombreux défis à relever. Le premier est un défi technique. En effet, la logique sous-jacente des systèmes biologiques est difficile à appréhender du fait de milliards d'années d'évolution et de sélection naturelle. Cette complexité est un frein à l'ingénierie rationnelle de systèmes biologiques synthétiques. De plus, la combinaison de différents composants issus de contextes divers dans un nouvel environnement peut donner lieu à des systèmes inopérants. Ces problèmes commencent à être résolus, mais le chemin est encore long pour atteindre la fiabilité que l'on peut retrouver dans d'autres sciences comme l'électronique ou l'aéronautique.

Le deuxième défi est sécuritaire : dans le cas de cellules synthétiques fonctionnant in vivo, des systèmes robustes de contrôle sont nécessaires avant de recevoir l'autorisation d'utilisation en clinique humaine de la part des instances régulatrices. D'autre part, il est important de mettre en place des barrières permettant de limiter la propagation accidentelle de ces organismes synthétiques dans l'environnement, par exemple en fabriquant des souches dépendantes de certaines molécules non présentes dans la nature. Cette approche a récemment été développée avec succès pour la bactérie *Escherichia coli*, dont plusieurs protéines essentielles ont été « recodées » pour être fonctionnelles uniquement si elles incorporent à des positions clés des acides aminés non naturels (3). On peut aussi concevoir des cellules utilisant des bases d'ADN non naturelles (4, 5). Ces méthodes prometteuses, appartenant au domaine de la xénobiologie (*), doivent être à présent généralisées et étendues à d'autres organismes.

JUSQU'OÙ ALLER ?

Il reste enfin des défis sociétaux et éthiques : *« Un grand pouvoir implique une grande responsabilité »*, rappelait Voltaire. Nous disposons déjà d'une capacité accrue à modifier le vivant, et posséderons dans quelques années ce grand pouvoir, celui de reprogrammation du monde vivant autour et à l'intérieur de nous. Jusqu'où aller ? Comment développer cette technologie de manière responsable ? Des garde-fous doivent être posés, notamment par les comités d'éthique. Plus encore, des débats impliquant toutes les franges de la société civile (et servant aussi de support au travail des législateurs) doivent avoir lieu. La biologie synthétique va certainement changer radicalement le monde dans lequel nous vivons. Veillons tous à ce que cette transition se fasse de manière positive, enthousiaste, transparente et responsable. ■

(1) A. Courbet *et al., Science Translational Medicine, 289,* 2015.
(2) J. Bonnet *et al. Science, 340, 599, 2013.*
(3) D. J. Mandell *et al., Nature. 518,* 55, 2015.
(4) P. Marlière *et al., Angew. Chem. Int. Ed Engl., 50,* 7109, 2011.
(5) D. A. Malyshev *et al., Nature, 509,* 385, 2014.

(*) **La xénobiologie** est la science visant à la conception de formes de vies utilisant des « briques moléculaires » n'existant pas dans la nature. Ces organismes seraient donc incapables d'interagir avec le monde vivant tel que nous le connaissons.

ABONNEZ-VOUS À SCIENCES ET AVENIR

ET SOYEZ CHAQUE MOIS
À LA POINTE DE L'ACTUALITÉ
SCIENTIFIQUE

1 AN
D'ABONNEMENT
12 Numéros + 4 Hors série
Papier + Numérique
pour seulement
48 €*
au lieu de 80,80 €

EN CADEAU

cet outil multifonctions
(surligneur, lampe, laser)

* Prix de vente au numéro

OFFRE DÉCOUVERTE

SCIENCES ET AVENIR

Bulletin à compléter et à envoyer sous enveloppe à :
Sciences et Avenir : 8 rue Jean Antoine de Baïf
CS 51402 - 75647 - Paris - Cedex 13

☐ **OUI,** **je désire profiter de l'offre découverte : 1 an d'abonnement (12 numéros + 4 HS - Versions Papier et Numérique) pour 48 € seulement au lieu de 80,80 € et je recevrai mon outil multifonctions.**

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : |_|_|_|_|_| Ville : _____

E-mail : _____

Pour recevoir la version numérique, indiquez votre email.

☐ Je souhaite recevoir par mail des offres et des informations de Sciences et Avenir ou de ses partenaires.

Je joins mon règlement de 48 € par chèque à l'ordre de Sciences et Avenir.

Date et signature obligatoires :

2 EZ05 - 3C08

Tchernobyl

L'impact des rayonnements à faible dose

L'effet des radionucléides présents dans l'environnement depuis la catastrophe de Tchernobyl a été étudié chez l'animal. Plusieurs systèmes sont touchés, bien qu'aucune maladie ne se déclare.

Christelle Adam-Guillermin, écotoxicologue, **Jean-Marc Bertho,** immuno-hématologue, **Philippe Lestaevel,** neurotoxicologue, et **Maâmar Souidi,** biologiste

Repères

- **L'explosion de Tchernobyl a provoqué le rejet de radionucléides, notamment du césium 137 et du strontium 90.**
- **Depuis 2003, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire mène des recherches sur les effets biologiques des expositions à faible dose à ces radionucléides.**
- **Les études expérimentales chez l'animal montrent que l'exposition chronique à ces éléments affecte certaines fonctions physiologiques et métaboliques.**

Les deux plus grosses catastrophes ayant frappé des centrales nucléaires – Tchernobyl en Ukraine, il y a trente ans, et Fukushima Daiichi au Japon, en 2011 – ont conduit à des rejets importants de radionucléides, ces isotopes radioactifs d'un élément chimique. Il s'agit notamment du césium 137 (^{137}Cs) et dans le cas de Tchernobyl, du strontium 90 (^{90}Sr). En se dispersant dans l'environnement, ces éléments ont contaminé de façon durable la chaîne alimentaire et les eaux. Les populations sont donc potentiellement exposées sur le long terme à ces deux radionucléides contributeurs majoritaires de la dose absorbée (*).

Quels sont les effets biologiques d'une exposition chronique de faible concentration ? Aussi étonnant que cela paraisse, ils sont encore mal connus. De nombreux effets ont été observés sur la faune et la flore : dommages à l'ADN, anomalies morphologiques, changements d'abondance et de diversité des espèces. Mais il est souvent difficile de prouver qu'ils sont dus aux radionucléides. Des mécanismes adaptatifs ont pu se mettre en place, compliquant l'interprétation des résultats. Chez l'homme, de rares effets sanitaires ont été rapportés tels que l'augmentation du nombre de cancers essentiellement liée à l'exposition aiguë (cancer de la thyroïde chez l'enfant et leucémie chez les liquidateurs ukrainiens). Ou des risques cardiovasculaires, mais ils sont sujets à controverse en raison de nombreux facteurs confondants et des limitations d'un point de vue méthodologique et statistique. D'où la mise en place, depuis 2003, par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) de programmes de recherche concernant les éventuels effets des expositions à faibles doses à ces radionucléides sur les grandes fonctions physiologiques. Voici la synthèse des connaissances actuelles issues de ces travaux. ■

(*) **La dose absorbée** est la quantité d'énergie cédée par les rayonnements ionisants lorsqu'ils pénètrent dans la matière. Elle s'exprime en grays (Gy).

(*) **Le césium** est un métal alcalin possédant 31 isotopes. En dehors de l'isotope 133, stable et présent à l'état naturel, tous sont radioactifs et d'origine anthropique.

CÉSIUM 137 et effets biologiques

De très grandes quantités de césium 137 (^{137}Cs) ont été libérées dans l'environnement, à la suite des accidents de Tchernobyl et de Fukushima Daiichi. Il s'agit d'un des isotopes radioactifs du césium (*), produits dans le réacteur nucléaire par la fission des noyaux d'uranium 235 et de plutonium 239. Les populations vivant dans les territoires situés à proximité de ces sites sont potentiellement exposées à ce radionucléide, principalement par l'ingestion quotidienne de

▲ *En 2006, soit vingt ans après la catastrophe de Tchernobyl, le village de Gubarevichi, situé à 3 kilomètres de la zone d'exclusion, était toujours sous surveillance. Les effets de la pollution à long terme restent mal connus.*

produits alimentaires contaminés. On considère qu'il a une faible toxicité chimique, mais une forte toxicité radiologique. Celle-ci est surtout liée à l'émission de rayonnement bêta et gamma. L'exposition humaine à la radioactivité est principalement due au ^{137}Cs en raison de sa période physique (*) longue de trente ans et de son transfert jusqu'à l'homme depuis l'environnement. Que sait-on de lui ? Il a un comportement physiologique proche de celui du potassium, sans aucun rôle biologique connu à ce jour. Après ingestion ou inhalation, le césium se retrouve à près de 100 % dans le sang. Il est très soluble dans les liquides physiologiques et est distribué de façon plus ou moins homogène dans les tissus. Les muscles striés, le foie et les reins présentent une concentration de ^{137}Cs plus élevée que la concentration moyenne dans le corps entier. Chez la femme enceinte, il peut traverser la barrière placentaire. L'excrétion du césium se fait principalement par les urines. Sa période biologique (*) varie de quelques jours à 150 jours chez l'homme, selon les tissus. Différents facteurs comme le sexe, le poids et l'âge jouent un rôle dans la rétention du césium (1).

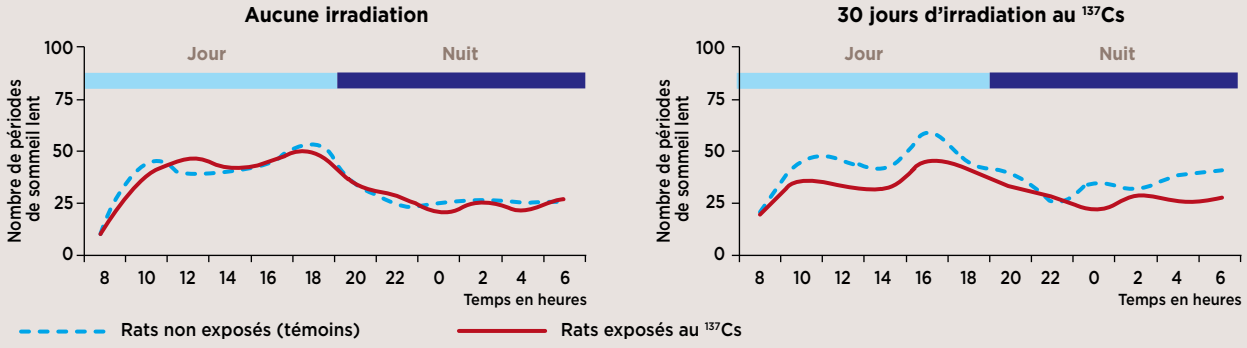
Pour mimer les situations d'exposition chronique, nous avons travaillé in vivo sur des modèles expérimentaux de rats et de souris. Ces derniers ont ingéré de l'eau contenant du ^{137}Cs en concentrations contrôlées et représentatives des doses auxquelles les populations ont pu être exposées (le contenu moyen d'un bol alimentaire chez des populations vivant dans les régions les plus contaminées d'Ukraine, du Bélarus •••

(*) **La période ou demi-vie physique** est le temps au bout duquel la moitié de la quantité initiale du radionucléide a disparu par désintégration nucléaire.

(*) **La période ou demi-vie biologique** est le temps au bout duquel la moitié du radionucléide présent initialement dans un organisme a disparu.

RIA NOVOSTI/SPL/COSMOS

Fig. 1 Un cycle veille-sommeil perturbé



Des rats sont exposés à de faibles doses de ^{137}Cs (en rouge). Avant exposition (Jour 0), leur sommeil et en particulier le nombre de périodes de sommeil lent, est identique à celui des rats non exposés (en bleu).

Après 30 jours, les rats irradiés montrent une diminution du nombre de périodes de sommeil lent, que l'on n'observe toutefois plus après 90 jours d'exposition.

Source : P. Lestaevel *et al., Toxicology, 226,* 118, 2006.

••• et de Russie varie de 100 à 2 000 becquerels (Bq) provenant du ^{137}Cs par jour ; dans nos études, la concentration utilisée varie entre 80 et 165 Bq/jour). Résultat : l'ingestion chronique de ^{137}Cs à faible dose n'induit pas de pathologie cérébrale particulière mais peut provoquer des perturbations passagères du cycle veille-sommeil. Après 30 jours d'exposition, le rongeur montre en effet une diminution du nombre d'épisodes d'éveil et de sommeil lent, que l'on n'observe toutefois pas après 90 jours (Fig. 1). Nous avons également montré que l'activité électroencéphalographique était modifiée, s'accompagnant d'une réponse pro et anti-inflammatoire sans conséquence grave pour le cerveau. En revanche, aucun effet du ^{137}Cs sur le comportement des animaux (locomotion, mémoire…) n'a été observé.

PAS DE PATHOLOGIE AVÉRÉE

D'autres études réalisées dans notre laboratoire ont mis en évidence des effets du ^{137}Cs sur des protéines – qui, pour être précis, possèdent une activité enzymatique de type cytochromes P450 – impliquées dans le métabolisme de la vitamine D, ce qui a pour conséquence une diminution du taux de vitamine D3 active dans le sang. Nous avons également montré une modification de certaines enzymes de cette famille de cytochromes P450 associée cette fois-ci au métabolisme du cholestérol au niveau du foie. Ces effets ne conduisent toutefois pas à des pathologies hépatiques avérées (2).

Quid du système cardiovasculaire ? Les rongeurs contaminés au ^{137}Cs présentent une modification de marqueurs sanguins d'atteinte cardiaque comme la créatine kinase, ainsi qu'une diminution de leur pression artérielle, alors que les tracés d'électrocardiogrammes sont normaux.

Très récemment dans notre laboratoire de l'IRSN, nous avons travaillé sur une souche de souris transgénique prédisposée à développer de l'athérosclérose (caractérisée par le dépôt d'une plaque d'athérome sur la paroi des artères, prédisposition aux maladies cardiovasculaires). Nous avons ainsi montré qu'une exposition à faible dose au ^{137}Cs provoque chez les animaux contaminés une modification de la composition biochimique, donc de la stabilité de la plaque d'athérome (3), mais sans accélérer la progression de l'athérosclérose. D'autres études sont nécessaires pour identifier les mécanismes d'action associés à cette modification de la composition des plaques et leur signification physiopathologique.

Pour compléter ces différentes études, nous avons réalisé au laboratoire une étude métabolomique (*) chez le rat exposé à des niveaux de contamination comparables à ceux rencontrés après l'accident, dans l'environnement proche de Tchernobyl. Cette étude a permis de montrer pour la première fois qu'il est possible de

(*) **La métabolomique** est une technique permettant de mesurer l'ensemble des molécules issues du fonctionnement, ou métabolisme, d'une cellule, d'un organe ou d'un organisme.

INFOGRAPHIE : MICHÈLE BOURGEOIS

distinguer des rats contaminés chroniquement par de faibles doses de ^{137}Cs de rats non contaminés (4). Elle montre également que l'exposition chronique au ^{137}Cs à des niveaux comparables à ceux de Tchernobyl induit des effets biologiques sans qu'une pathologie se développe pour autant. À noter qu'une simple analyse sanguine ou urinaire révèle une signature biologique d'une contamination interne. Cette technique pourrait à terme aider au tri des populations exposées et au diagnostic après une exposition à faible dose de rayonnements ionisants.

Les résultats de nos études expérimentales sur l'animal semblent ainsi montrer qu'une ingestion chronique de faibles doses de ^{137}Cs peut être responsable d'effets biologiques subtils mais significatifs. Ces effets sont observables sur différents organes (cœur, cerveau…) ou systèmes physiologiques, sans pour autant induire de pathologie. Néanmoins, plusieurs questions restent en suspens. Ces modifications physiologiques ou métaboliques de type non cancéreux constituent-elles les signes précurseurs de l'apparition plus tardive d'une pathologie avérée sur le plan clinique, ou sont-elles plutôt la conséquence d'une adaptation de l'organisme à cette contamination ? Ces effets biologiques peuvent-ils être transmis d'une génération à l'autre et si oui par quels mécanismes : génétique ou épigénétique ? Enfin, il est souhaitable que ces résultats expérimentaux puissent être corrélés à des études épidémiologiques sur des populations humaines vivant dans les territoires contaminés.

Or qu'en est-il de l'homme ? De nombreuses études de suivi sanitaire, qu'elles soient épidémiologiques ou de taille plus restreinte, ont été conduites par différentes équipes internationales sur des populations exposées vivant sur les territoires contaminés. Elles sont difficiles à interpréter car de nombreux autres facteurs peuvent affecter la santé de ces populations : aspects psychologiques, autres polluants ou radionucléides ingérés. Il est donc indispensable de poursuivre ces études, à la fois sur les populations exposées et sur des modèles expérimentaux, en s'attachant à avoir une meilleure définition des expositions réelles pour les premières et des expositions multiples, plus réalistes pour les seconds. ■

(1) J.-M. Bertho *et al., Journal of Radiological Protection, 31,* 25, 2011.
(2) M. Souidi *et al., Environnement, Risques & Santé, 12,* 151, 2013.
(3) C. Le Gallic *et al., PLoS One.5,* 10, 2015.
(4) S. Grison *et al., J. Radiat. Res., 53,* 33, 2012.

30 %

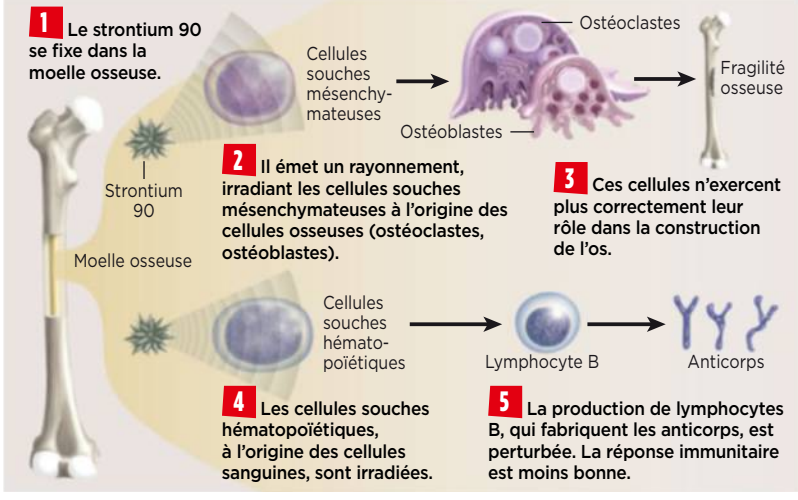
DU STRONTIUM 90 ingéré est absorbé par la barrière intestinale des mammifères supérieurs.

STRONTIUM 90 et système immunitaire

Le strontium 90 a été beaucoup moins étudié que le césium 137. Pourtant, ses propriétés en font tout autant un élément à risque après un accident nucléaire. Sa demi-vie physique (*) étant de 29 ans, il est lui aussi considéré comme un polluant rémanent à long terme. C'est un élément soluble, très mobile, qui intègre progressivement les chaînes alimentaires et émet des rayonnements bêta capables d'induire une densité de dommages élevée dans les tissus vivants.

Chez les mammifères supérieurs, le strontium est absorbé à 30 % environ au travers de la barrière intestinale, puis stocké principalement dans les os et les dents où il remplace le calcium dans les cristaux d'hydroxyapatite, l'un des principaux constituants de la matière osseuse. Du fait de la stabilité chimique de la liaison avec l'hydroxyapatite, la demi-vie biologique (*) du ^{90}Sr est très longue, environ cinq ans et demi •••

Fig. 2 Deux effets possibles dans la moelle osseuse


1 Le strontium 90 se fixe dans la moelle osseuse.
Cellules souches mésenchymateuses
Ostéoclastes
Ostéoblastes
Fragilité osseuse
Strontium 90
Moelle osseuse
2 Il émet un rayonnement, irradiant les cellules souches mésenchymateuses à l'origine des cellules osseuses (ostéoclastes, ostéoblastes).
3 Ces cellules n'exercent plus correctement leur rôle dans la construction de l'os.
Cellules souches hématopoïétiques
Lymphocyte B
Anticorps
4 Les cellules souches hématopoïétiques, à l'origine des cellules sanguines, sont irradiées.
5 La production de lymphocytes B, qui fabriquent les anticorps, est perturbée. La réponse immunitaire est moins bonne.

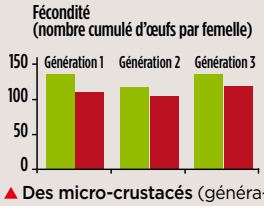
INFOGRAPHIE : SYLVIE DESSERT

(*) **La résorption osseuse** est un mécanisme naturel de dégradation de l'os, en équilibre avec la synthèse osseuse et permettant de maintenir la qualité du tissu osseux tout au long de la vie.

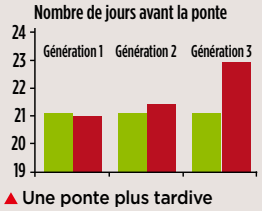
••• chez l'homme. Enfin, le ^{90}Sr s'accumule plus facilement dans les zones de croissance osseuse. Ceci explique que son accumulation augmente davantage chez les jeunes que chez l'adulte.
Le stockage dans l'os du ^{90}Sr induit une irradiation significative des tissus environnants, essentiellement celui de la bordure osseuse et la moelle osseuse (Fig.2). De fait, l'étude des populations exposées aux retombées de l'accident de Kyshtym, en Russie, en 1957, montre un excès de leucémies, une réduction progressive du nombre de globules blancs circulants et une accélération de la résorption osseuse (*). Cependant, ces études épidémiologiques, comme pour le cas du ^{137}Cs, présentent de nombreux facteurs confondants, qui en rendent l'interprétation difficile.
À l'IRSN, nous avons exposé de façon chronique des souris en leur faisant ingérer du ^{90}Sr via l'eau de boisson à des concentrations représentatives de celles retrouvées dans des territoires contaminés. Ces travaux nous ont permis de confirmer que le strontium s'accumule plus vite chez les jeunes, et de façon plus importante chez les femelles (1). L'exposition chronique au ^{90}Sr dès la vie utérine induit une modification du métabolisme osseux chez les animaux adultes et des modifications faibles mais significatives des populations de lymphocytes B dans la moelle osseuse. Ceux-ci étant des acteurs essentiels de la réponse immunitaire, nous avons donc testé les rongeurs contaminés en les vaccinant avec la toxine tétanique et en évaluant leur réponse immunitaire face au vaccin. Résultat, celle-ci a bien été modifiée, avec diminution significative du taux d'anticorps antitoxine tétanique. Ceci pourrait s'expliquer par un effet d'irradiation direct du ^{90}Sr sur les cellules mésenchymateuses, localisées à proximité de l'os (2). Ces cellules sont connues pour jouer un rôle central dans la régulation de la différentiation lymphocytaire B dans la moelle osseuse. Les travaux actuels de l'IRSN s'attachent à comprendre les mécanismes d'action du ^{90}Sr sur ces cellules et les conséquences au niveau cellulaire. ■

(1) N. Synhaeve *et al., Radiat. Environ. Biophys., 50,* 501, 2011.
(2) N. Synhaeve *et al., J. Appl. Toxicol., 34,* 76, 2014.

Fig. 3 La transmission héréditaire des effets



▲ **Des micro-crustacés** (génération 1) et leur descendance (générations 2 et 3) ont été exposés à une irradiation chronique à faible dose durant toute leur vie (35 milligrays/heure). On observe alors une fécondité réduite des femelles dès la première génération.



▲ **Une ponte plus tardive** est également notée dans la génération 3, liée à un retard de croissance (non visible sur les graphes).
Source: F. Parisot *et al., Aquat Toxicol., 163,* 27, 2015.

Micro-crustacés non irradiés (témoins)
Micro-crustacés irradiés

DES ÉCOSYSTÈMES qui s'adaptent

À partir de l'automne 1986, l'exposition des écosystèmes aux radionucléides à Tchernobyl diminue considérablement. Les effets rapportés dans la littérature pour cette période sont souvent contradictoires. Dans ce cadre, nos recherches soulignent d'abord l'importance de la notion d'exposition chronique. Il a en effet été montré chez le poisson zèbre que pour une forte dose d'irradiation gamma (2 grays), aucun effet n'est observé sur le développement embryonnaire lorsque les œufs sont irradiés pendant plusieurs jours. En revanche, 30 % des larves issues de ces œufs sont mal formées lorsque cette même dose est délivrée en 2 minutes. Ces malformations proviennent d'un taux élevé de cassures (CDB), qui affectent les deux brins de l'ADN – des lésions majeures, plus difficiles à réparer et pouvant mener à des mutations. En conditions d'irradiation chronique, si de nombreuses CDB sont également observées, elles sont éliminées efficacement par la mort de la cellule, moindre mal permettant de limiter les conséquences à plus long terme dans l'organisme (1). La signification biologique de ces dommages à l'ADN prend toute son importance lors de l'étude de la transmission héréditaire des effets. Celle-ci a été réalisée chez des micro-crustacés qui ont été irradiés de façon chronique sur trois générations successives (Fig. 3). Une aggravation des effets sur la survie, la croissance et la reproduction, parallèlement à l'accumulation de dommages à l'ADN, a alors été observée. Dans la deuxième génération exposée, on observe une plus grande efficacité de réparation de l'ADN et des effets moins sévères. Toutefois, cette tendance s'inverse dans la troisième génération, avec l'apparition d'effets plus sévères que dans la première génération (2). Ces études montrent que les faibles doses absorbées à la suite d'une irradiation pourraient avoir des conséquences génétiques et affecter la dynamique des populations exposées de façon continue, en tout cas pour les espèces les plus primaires. Que se passe-t-il lorsque l'irradiation cesse? Nous l'avons étudié

INFOGRAPHIE MICHÈLE BOURGEOIS

▲ *Une équipe de l'IRSN réalise un échantillonnage de sol dans la zone d'exclusion de Tchernobyl, en vue d'étudier les effets de la contamination radioactive sur la diversité des nématodes.*

chez un autre invertébré de la famille des vers, le nématode : ces effets sur l'ADN et la reproduction persistent dans les trois générations de descendants non irradiées, ce qui suggère la transmission de mutations ou de modifications épigénétiques.

À plus long terme, les radiations ionisantes sont susceptibles d'affecter la diversité des espèces par la sélection des individus les plus performants en termes de reproduction et de survie. C'est probablement ce qui s'est produit à Tchernobyl après l'accident chez les communautés de nématodes de la zone d'exclusion. En effet, une étude récente a montré que la diversité de ces communautés était peu affectée par les radiations ionisantes, avec la présence d'une majorité de taxons résistant à la pollution, ces espèces ayant probablement été sélectionnées au profit d'espèces plus sensibles (3).

L'inquiétude du public à l'égard de la qualité de l'environnement et des risques qui la menacent a été alimentée par plusieurs crises illustrées dans le domaine du nucléaire par l'accident de Tchernobyl et plus récemment celui de Fukushima Daiichi. Les radionucléides à demi-vie longue rejetés à la suite de ces accidents nucléaires, tels que le ^{137}Cs et le ^{90}Sr, présentent une radiotoxicité élevée. Pour la faune et la flore composant les écosystèmes, les conséquences écologiques d'une exposition chronique à de faibles doses doivent encore être comprises dans un contexte plus réaliste, caractérisé par l'exposition sur plusieurs générations et l'influence de divers facteurs de stress concomitants (événements climatiques, fluctuation des ressources en nourriture, présence d'autres contaminants…). La persistance de ces radionucléides dans l'environnement, parfois pendant des dizaines d'années, pourrait engendrer des risques sanitaires associés à une exposition chronique à faibles doses. Dans de telles conditions d'exposition chronique, les études expérimentales chez l'animal montrent que l'exposition au ^{137}Cs ou au ^{90}Sr affecte certaines fonctions physiologiques et métaboliques.

RISQUE D'EFFET COCKTAIL

Ces dernières décennies ont vu l'émergence de changements de paradigme dans la perception du risque en toxicologie. Un concept a émergé notamment, celui de l'effet cocktail – dans lequel l'effet d'une substance, peu dangereuse seule, est potentialisé par la présence d'autres molécules – ou des effets de multi-expositions complexes. Dans les sites radiocontaminés, les organismes sont toujours exposés à plusieurs contaminants, radionucléides et polluants chimiques. Une autre question majeure est celle de la transmission des effets biologiques au fil des générations, notamment par des voies épigénétiques. Ces processus sont connus pour leur rôle dans l'induction de cancers, mais également dans la réponse évolutive des organismes. Ainsi, des effets épigénétiques ont été mis en évidence sur des pins à Tchernobyl, conférant au génome une plasticité lui permettant de s'adapter aux conditions environnementales défavorables. Pour aller plus loin sur ces aspects, des études expérimentales chez l'animal ont été initiées à l'IRSN pour répondre à la question des effets héréditaires via des mécanismes épigénétiques après exposition au ^{137}Cs ou à d'autres radionucléides comme l'uranium. ■

(1) S. Pereira *et al., Environ Toxicol Chem., 2,* 2831, 2011.
(2) F. Parisot *et al., Aquat Toxicol., 163,* 27, 2015.
(3) C. Lecomte-Pradines *et al., Sci Total Environ., 490,* 161, 2014.

JEAN-MARC BONZOM/IRSN

En vente actuellement

www.magazine-litteraire.com

Télécharger dans l'App Store

DISPONIBLE SUR Google play

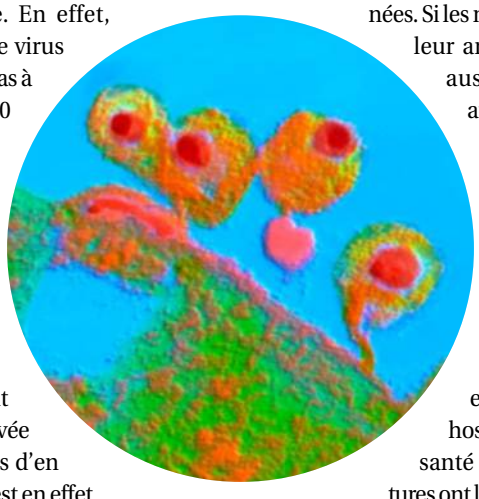
Quand les migrants contractent le sida en France

Les migrants d'Afrique subsaharienne arriveraient en France déjà infectés par le virus du sida ? Faux : bon nombre d'entre eux sont contaminés dans l'Hexagone. En cause, la grande précarité à laquelle ils sont confrontés.

Annabel Desgrées du Loû, démographe

En 2013, sur 6 220 nouveaux cas de VIH/sida diagnostiqués en France, 31 % concernaient les migrants d'Afrique subsaharienne (Fig. 1) (1). À première vue, ces chiffres semblent refléter la carte de l'épidémie de VIH/sida : puisque le continent africain est le plus touché, les personnes qui en arrivent ont plus de risques que les autres d'avoir contracté ce virus.

Pourtant, depuis quelques années, la situation semble plus complexe. En effet, l'analyse des souches de virus pour tous les nouveaux cas à partir des années 2000 montre qu'environ un Africain sur quatre diagnostiqué pour un VIH en France a une souche de virus très rare en Afrique mais très commune en Europe, ce qui suggère qu'il a très probablement été infecté après son arrivée en Europe. Difficile alors d'en savoir plus. Le VIH/sida est en effet une pathologie qui reste sans signe clinique apparent pendant plusieurs années, et les personnes atteintes ignorent en général quand elles ont été infectées. La très grande majorité des migrants porteurs du VIH découvrent leur séropositivité seulement une fois arrivés en France car les tests sont plus accessibles que dans leurs pays d'origine. Pour autant, ils ne savent pas s'ils ont été infectés avant ou après leur arrivée. Or pour la santé publique, ce n'est pas un détail : si le VIH/sida qui touche les migrants africains en France est une épidémie « d'importation », la seule chose à faire est de proposer un dépistage le plus tôt possible à l'arrivée en France, afin de prendre en charge efficacement les personnes contaminées. Si les migrants s'infectent après leur arrivée en France, il faut aussi déployer des efforts autour de la prévention.



CNRI/SPL CNRI/SPL/COSMOS

▲ *Des virus du sida (en haut) bourgeonnent sur un lymphocyte CD4 contaminé.*

Pour mieux comprendre les spécificités de l'infection par le virus du sida et ses conséquences dans cette population des migrants africains, nous avons conduit une enquête dans les services hospitaliers et les centres de santé généralistes. Ces structures ont le mérite d'être accessibles à tous, sans conditions de titre de séjour ou de revenus, et de garantir la confidentialité, tant sur la •••

Repères

- **Une enquête approfondie a été réalisée sur un échantillon de migrants subsahariens suivis pour une infection par le VIH/sida dans les structures de santé.**
- **Près d'un homme africain sur deux, suivi aujourd'hui pour un VIH, a contracté ce virus après son arrivée en France. Pour les femmes, ce chiffre est de une sur trois.**
- **Des efforts doivent être déployés pour éviter les contaminations et faire en sorte que les programmes de lutte contre le sida atteignent les migrants là où ils sont.**

35 % À 49 %

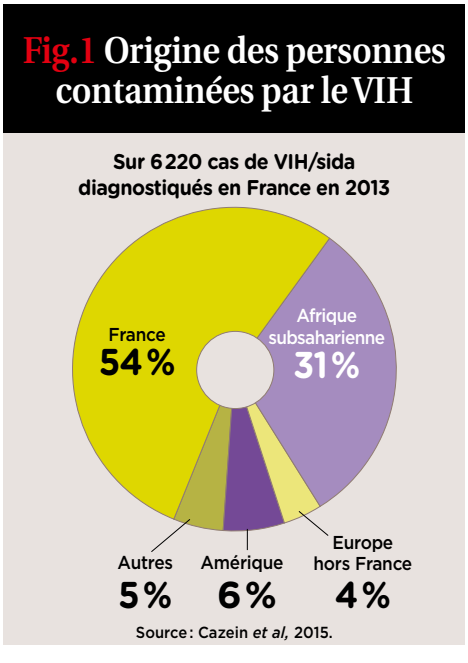
DES MIGRANTS AFRICAINS suivis pour une infection VIH ont contracté ce virus après leur arrivée en France. Selon l'hypothèse retenue : stricte – l'estimation est probable à 95 % –, ou médiane – l'estimation est probable à 50 %.

••• maladie que sur les conditions de séjour. En Île-de-France, cette enquête a été réalisée sur un échantillon représentatif de migrants subsahariens suivis pour une infection par le VIH/sida (926 personnes, dont 353 hommes et 573 femmes).

C'est le médecin traitant qui proposait à ses patients subsahariens de participer à l'étude. Chaque personne qui acceptait rencontrait à la fin de la consultation un enquêteur, et pendant environ une heure était amenée à retracer (presque) toute sa vie. L'objectif de l'enquête était en effet de collecter des informations non seulement sur l'état de santé et les conditions de vie de la personne au moment de l'enquête, mais aussi sur son histoire familiale (unions, enfants, relations occasionnelles) et professionnelle, son parcours migratoire, ses logements et titres de séjour successifs : l'ambition était de se donner les moyens d'analyser l'enchaînement des divers événements et situations de la vie, pour comprendre quand et comment l'infection VIH/sida survient par rapport à ces situations, et ce qu'elle change dans le parcours de vie. D'où le nom de l'enquête : Parcours.

Ce type d'approche dit « biographique », très utilisé par les socio-anthropologues, est encore pionnier dans les sciences sociales quantitatives. Cela est dû en particulier à sa complexité, tant au niveau du recueil de l'information que du traitement statistique de ces données longitudinales : il s'agit en effet de traduire des vies entières sous une forme simplifiée et standardisée pour un traitement statistique, afin de pouvoir analyser de façon quantitative la place des événements dans le parcours de vie et faire émerger leurs causes.

Fig.1 Origine des personnes contaminées par le VIH



Source : Cazein *et al*, 2015.

INFOGRAPHIE PATRICK GARCIA

RELATIONS SEXUELLES CONTRAINTES

En combinant les informations tirées de ces histoires de vie et des données biologiques, nous estimons que 35 à 49 % des migrants africains suivis pour une infection VIH ont contracté ce virus après leur arrivée en France (2). Il s'agit principalement d'hommes : près d'un homme africain sur deux, suivi aujourd'hui pour un VIH, a contracté ce virus sur le sol français, ce chiffre est de une sur trois pour les femmes. Nous avons considéré qu'une personne avait été infectée en France lorsqu'elle avait été diagnostiquée au moins onze ans après son arrivée, ou qu'elle y avait eu un test de dépistage du VIH négatif, ou encore qu'elle y avait commencé sa vie sexuelle. Pour toutes les autres, nous avons utilisé une modélisation mathématique du déclin des lymphocytes CD4, cellules immunitaires progressivement détruites par le virus, pour estimer à partir du nombre de CD4 mesuré au moment du diagnostic depuis combien de temps les personnes étaient infectées.

Dans quel cadre ces infections surviennent-elles ? Pour le savoir, nous avons mis en relation, pour chaque année vécue en France, les situations sexuelles et les conditions de vie. Pour beaucoup de migrants, l'arrivée sur le sol français est un moment d'insécurité et de précarité : plus des deux tiers des personnes enquêtées n'avaient pas de titre de séjour valable pour au moins un an au cours de leur première année en France, et ont vécu avec des récépissés de demande de titre de séjour, voire pas de titre de séjour du tout. Une personne sur cinq n'avait pas de logement stable au cours de cette première année et a dû changer fréquemment d'hébergement.

Cette insécurité dure plusieurs années, et cette période de précarité est aussi une période où la sexualité expose à plus de risques : toutes choses égales par ailleurs, les hommes et femmes africains ont plus de relations sexuelles occasionnelles les années où ils n'ont pas de logement stable. Les femmes en particulier, lorsqu'elles n'avaient pas de logement ou pas de titre de

OLIVIER JOBARD / MYOP

séjour, ont dû accepter des relations sexuelles qu'elles ne souhaitaient pas, en échange de logement, d'aide matérielle ou par peur d'être expulsées. La précarité apparaît ainsi comme un facteur indirect de l'infection par le VIH pour les migrants africains vivant en France (3).

Au niveau européen, il y a peu d'études de ce type mais les mesures des contaminations VIH postmigration, lorsqu'elles existent, vont dans le même sens. En Grande-Bretagne, à partir de la surveillance des nouveaux diagnostics VIH, et en utilisant la seule modélisation du déclin des lymphocytes CD4 pour retracer le délai depuis l'infection au diagnostic, la part des Africains subsahariens infectés après la migration est estimée à 37 % en hypothèse médiane (4). Une enquête récente a été réalisée au niveau européen auprès de 2 250 migrants vivant avec le VIH, de toutes origines : l'enquête aMASE (5). Pour les migrants originaires d'Afrique subsaharienne, qui représentent un tiers des migrants suivis, on peut estimer, en s'appuyant sur les histoires de dépistage et des données comportementales, que 31 % au moins ont été infectés par le VIH après la migration. Pour les migrants venus d'ailleurs, les chiffres sont encore plus élevés : plus de la moitié des Asiatiques et deux tiers des Caribéens vivant avec le VIH en Europe auraient été infectés après leur arrivée en Europe.

DÉPISTAGE RAPIDE

Ces résultats changent l'image qu'on avait de l'épidémie de VIH/sida chez les migrants en Europe. Il ne s'agit plus d'une maladie « d'importation » qu'il faut prendre en charge le mieux possible. Il faut rompre la chaîne de la contamination après l'arrivée. Comment ?

Pour commencer, il est primordial de proposer un dépistage du VIH le plus tôt possible à l'arrivée des migrants, puisque la très grande majorité des personnes porteuses du virus lors de leur arrivée en France ignorent leur statut sérologique. Un diagnostic rapide après l'arrivée en France permet, en cas de séropositivité, la prise en charge et le traitement de l'infection et bloque la multiplication du virus dans l'organisme. Au-delà du bénéfice individuel pour la personne concernée, cela protège aussi ses partenaires sexuels d'une éventuelle contamination, •••

▲ *Pour les migrants, l'arrivée sur le sol français est souvent synonyme d'insécurité et de précarité. Nombreux sont ceux qui n'ont alors qu'un titre de séjour provisoire, voire pas de titre de séjour du tout, ni hébergement stable, ce qui est un facteur indirect favorisant l'infection par le VIH.*

••• puisque le virus ainsi contrôlé devient «indétectable» dans le sang et les liquides séminaux qui ne le transmettent plus.
Pour les mêmes raisons, le dépistage doit être répété régulièrement, pour limiter au maximum la période entre infection et diagnostic: on estime en effet que 60 % des nouvelles contaminations sont dues à des gens qui ignorent leur séropositivité. Cela passe par la conjugaison de toutes les formes de dépistage existantes: des plus classiques (en laboratoire et dans des centres spécialisés) à ceux qui vont au-devant des populations dans les espaces publics ou festifs, et à l'utilisation de l'autotest, disponible depuis quelques mois.
Enfin, la prévention doit être renforcée chez les migrants: il faut sans doute mieux sensibiliser les Africains qui vivent en France sur les risques de contamination qui y existent, et sur les moyens de s'en prémunir: utiliser des préservatifs, demander à son/ses partenaire(s) de faire un dépistage VIH. De nombreuses campagnes en ce sens ont été menées en France, qui semblent avoir été efficaces puisque le nombre de diagnostics chez les migrants a diminué dans les années 2000. Mais aujourd'hui, cela ne suffit pas. Pour les personnes qui ne se sentent pas en mesure de suivre les conseils de prévention et d'éviter les relations à risque, comme les femmes en situation de précarité et de dépendance, la prophylaxie pré-exposition est peut-être un espoir: deux essais cliniques ont récemment démontré chez les homosexuels que la prise d'antirétroviraux de façon préventive lors de rapports à risque diminue de 86 % le risque d'être infecté par le VIH. Pour les femmes, ce résultat reste à consolider, mais d'ores et déjà cette prophylaxie pré-exposition semble être un outil de poids à rajouter dans la panoplie de la «prévention combinée».

Ce n'est qu'une fois libérés de l'extrême insécurité que les migrants peuvent penser à se protéger

ACTIONS DE PROXIMITÉ

Quels que soient les outils, encore faut-il qu'ils rencontrent leurs utilisateurs potentiels. L'enjeu est aujourd'hui de les faire connaître et de les rendre accessibles à ceux qui en ont besoin, au moment où ils en ont besoin. Les programmes de lutte contre le sida chez les migrants doivent donc sortir des structures de santé, rejoindre les gens là où ils sont, et tenir compte de leurs conditions de vie. Cela passera sans doute par des actions « de proximité », pensées et organisées au niveau local, qui mobilisent et rassemblent les services de soins, les médecins de ville et les associations, dans les communes et quartiers où les populations africaines sont les plus présentes.
Notre enquête a aussi montré qu'au-delà des outils de la prévention, ce sont les conditions de vie qui cadrent l'univers des possibles: la première chose dont les migrants ont besoin pour prendre soin d'eux-mêmes et se protéger du VIH/sida, c'est de pouvoir y penser. Cela n'est possible qu'une fois libérés de l'extrême insécurité, de l'angoisse liée à des démarches administratives lourdes et à l'issue incertaine, du souci d'avoir un toit où dormir. ■

▶ *Voici l'affiche de l'étude Parcours menée en Île-de-France. L'objectif de cette étude était d'analyser le parcours de vie des migrants d'origine subsaharienne, pour comprendre quand et comment l'infection VIH/sida survient dans cette population.*

DR

(1) F. Cazein *et al., BEH, 9-10,* 152, 2015.
(2) A. Desgrées du Loû, *Eurosurveillance, 20,* 46, doi:10.2807/1560-7917.ES.2015.20.46.30065, 2016.
(3) A. Desgrées du Loû *et al., AIDS, 30* (4), 645, 2016.
(4) B. Rice *et al., Sexually Transmitted Diseases, 41* (4), 2014.
(5) D. Alvarez del Arco *et al.,* Abstract PS3/5., 2015. www.professionalabstracts.com/eacs2015/iplanner/

Le Monde & La Recherche

FORUM

SCIENCE, RECHERCHE & SOCIÉTÉ

8e édition

ENTRÉE LIBRE

CULTIVONS LE FUTUR

25 mai 2016

CNAM, CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS & MÉTIERS.

DÉBATS + RENCONTRES + EXPO + FILM

En partenariat avec :

Avec le soutien de :

#FORUMSRS

www.forum-srs.com

Design graphique : Agence **HYPNOZ** - Crédits photos : Shutterstock.

8e édition

FORUM
SCIENCE, RECHERCHE & SOCIÉTÉ

coorganisé par :

Le Monde & La Recherche

le mercredi 25 mai 2016 au CNAM

DÉCOUVREZ LES TEMPS FORTS DE CETTE JOURNÉE QUI ACCUEILLE CHAQUE ANNÉE UN MILLIER DE PARTICIPANTS

Inscription gratuite sur : www.forum-srs.com

#FORUMSRS

Programme de la matinée

9h15 - 11h15 // CONFÉRENCE PLÉNIÈRE 1 - Demain, un bébé sur mesure ?

- **Élisabeth Badinter,** philosophe (sous réserve)
- **Pierre Jouannet,** médecin, auteur du rapport de l'Académie de médecine « Modifications du génome des cellules germinales et de l'embryon humain »
- **Emmanuelle Rial-Sebbag,** chargée de recherche Inserm, juriste dans l'équipe 4 de l'UMR 1027 Inserm / université Toulouse III - Paul Sabatier

C'est un des grands fantasmes du XXe siècle : avoir un bébé parfait. Avec le développement du dépistage prénatal, la science et la médecine nous ont donné les moyens d'éviter que l'enfant à naître développe certaines maladies graves. Aujourd'hui, l'avènement d'une nouvelle technique de génie génétique appelée CrispR-Cas9, apporte un moyen inédit de manipuler le génome. Jusqu'où les nouvelles techniques génétiques peuvent-elles aller ? La manipulation génétique de l'embryon est-elle pour demain ? Faut-il parler de progrès ou de menace ? D'où vient notre désir d'enfant parfait ?

11h30 // ALLOCUTION DE THIERRY MANDON, secrétaire d'État chargé de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (sous réserve)

11h45 - 13h15 // TABLES RONDES (en parallèle)

Les vaccins sont-ils dangereux ?

- **Alain Fischer,** immunologiste, pionnier de la thérapie génique, directeur de l'Institut Imagine, président du comité d'orientation de la « concertation citoyenne sur la vaccination ».
- **Odile Launay,** infectiologue à l'hôpital Cochin et responsable du seul centre d'investigation clinique dédié au vaccin en France.
- **Frédéric Tangy,** responsable de l'unité génomique virale et vaccination à l'Institut Pasteur.

La vaccination fait l'objet de controverses et de doutes. À tel point qu'une concertation nationale a été engagée par le gouvernement. Les vaccins obligatoires sont-ils utiles ? Pourquoi un vaccin peut-il être combiné à un autre ? Comment sont encadrés leurs essais chez l'homme ? Comment évalue-t-on leur efficacité ? Doivent-ils être recommandés ou obligatoires ?

De la manipulation à l'endoctrinement : sommes-nous tous influençables ?

- **Dounia Bouzar,** anthropologue. Elle est la fondatrice du centre de prévention des dérives sectaires liées à l'islam (CPDSI) destiné à sortir les jeunes de l'embrigadement islamiste.
- **Roland Coutenceau,** psychiatre, psychanaliste et psychocriminologue. Il est président de la Ligue française pour la santé mentale.
- **François Margolin,** réalisateur, producteur et scénariste. Il est le coréalisateur du film documentaire *Salafistes*.

Comment se protéger de la manipulation et de l'endoctrinement ? Une étape essentielle est sans doute d'en analyser les leviers, d'en décrypter les mécanismes pour mieux s'en prémunir. Car si un individu peut facilement être dupé, s'il peut être amené à modifier ses opinions et à adhérer à des croyances – parfois folles ou extrêmes –, il possède aussi les ressources pour résister et pour renoncer. La pensée critique et le doute méthodique prôné par Descartes sont autant de remèdes pour déjouer les pièges des manipulateurs.

CULTIVONS LE FUTUR
25 mai 2016

CNAM
CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS & MÉTIERS

DÉBATS + RENCONTRES + EXPO + FILM

À LA **UNE**

Les sciences participatives

En fil rouge tout au long de la journée avec :

- **une conférence plénière** en présence de **François Houllier,** président de l'Institut national de recherche en agronomie et coauteur d'un rapport sur les sciences participatives pour le ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche
- **un sondage dédié IPSOS - Le Monde - La Recherche**
- **une animation dans la cour d'honneur du CNAM**

Vin et changement climatique : les vins français vont-ils résister ?

- **Hervé Quénol,** directeur de recherche CNRS, coordinateur du projet Life ADVICLIM (Adaptation de la viticulture au changement climatique).
- **Jean-Claude Rateau,** vigneron bourguignon (sous réserve).
- **Jean-Marc Touzard,** directeur de recherche à l'INRA, coordinateur du projet LACCAVE (Adaptation à long terme au changement climatique pour la viticulture et l'œnologie).

Quel vin boira-t-on en 2050 ? La vigne résistera-t-elle à l'augmentation des températures ? Comment s'adapteront les vignobles à ces nouvelles conditions climatiques ? Autant de questions sur lesquelles les scientifiques travaillent aujourd'hui. Ils ont pour cela de nombreux outils à leur disposition, comme la génétique, la mise en place de scénarios d'adaptation, ou encore l'expérimentation grandeur nature, sur une parcelle dans le sud de la France. Avec un seul objectif : imaginer le vin de demain.

À qui appartient l'espace ?

- **Stéphane Israël,** président-directeur général d'Arianespace.

Un traité international de 1967 stipule que l'espace extra-atmosphérique n'appartient à personne. Même chose pour l'océan hors zones exclusives, mais rien n'empêche d'y pêcher des poissons. C'est cette lecture du droit international qui a conduit coup sur coup ces derniers mois les États-Unis et le Luxembourg à proposer des cadres juridiques et réglementaires permettant d'exploiter les richesses naturelles d'astéroïdes ou de la Lune. Leur position est-elle tenable ?

À VOIR ÉGALEMENT

Assistez à la présentation des sujets de recherche de 10 jeunes chercheurs émérites et reconnus.

Programme de l'après-midi

Programme de l'après-midi

Mercredi 25 mai 2016 • CNAM

14h - 16h // CONFÉRENCE PLÉNIÈRE 2 - Les Français et la science : quand les citoyens s'impliquent dans les projets scientifiques

- **Émeline Bentz,** écologue, responsable des sciences participatives à la Fondation Nicolas Hulot.
- **Romain Julliard,** biologiste de la conservation, responsable scientifique du programme Vigie-Nature piloté par le Muséum d'histoire naturelle. Coordinateur du programme participatif 65 millions d'observateurs.
- **François Houllier,** président de l'Institut national de recherche en agronomie, et coauteur d'un rapport sur les sciences participatives qu'il a rendu en janvier dernier.
- **Brice Teinturier,** politologue, directeur général délégué d'Ipsos.

Autour d'un sondage commandé spécialement pour l'occasion, nos invités discuteront d'une nouvelle façon de faire de la science, la science participative, et de la manière dont on peut accompagner cette implication citoyenne. Les sciences participatives ont en effet pris une nouvelle ampleur avec la mise à disposition d'outils modernes. Les amateurs de sciences d'hier deviennent aujourd'hui des auxiliaires de la recherche, produisant des succès remarquables, avec des publications dans le domaine de l'astronomie ou des bases de données sur la biodiversité par exemple.

17h - 18h // TABLES RONDES (en parallèle)

Ondes gravitationnelles : des secousses de l'espace-temps pleines de promesses

- **Nicolas Arnaud,** chercheur au CNRS au laboratoire de l'accélérateur linéaire d'Orsay et membre de la collaboration internationale Virgo. Il a codirigé l'ouvrage, *Passeport pour deux infinis* (Dunod).
- **Pierre Binétruy,** professeur à l'université Paris-Diderot, spécialiste de cosmologie et de gravitation et auteur du livre *À la poursuite des ondes gravitationnelles* (Dunod).

Après l'annonce tonitruante, en février, d'une première observation de ces mystérieuses ondes, d'autres devraient suivre. Que sait-on d'elles et surtout de la danse de deux trous noirs qui leur ont donné naissance ? Que peut-on espérer apprendre dans les prochains mois ? Un nouvel âge de l'astronomie est-il en train de s'ouvrir ? Cette nouvelle preuve de la puissance de la théorie d'Einstein de la Relativité n'a pas fini de secouer les imaginations et les chercheurs.

Le moustique transgénique, arme fatale contre le paludisme et le virus Zika ?

- **Eric Marois,** biologiste, directeur de recherche à l'Inserm, Strasbourg.
- **Jennifer Merchant,** politologue, université Paris-II, membre du comité d'éthique de l'Inserm.
- **Frédéric Simard,** entomologiste, directeur de l'unité de recherche Maladies infectieuses et vecteurs, IRD, Montpellier.

Tandis que le paludisme continue de ravager de nombreux pays tropicaux, que la dengue ne cesse d'étendre sa présence, un nouveau virus a fait son apparition : Zika. Ces trois pathogènes, transmis par les moustiques, semblent se jouer des parades mises en place. Les scientifiques ont donc eu l'idée d'utiliser l'insecte lui-même pour combattre la maladie. Ces moustiques génétiquement modifiés peuvent-ils venir à bout des agents infectieux ? Présentent-ils une menace pour l'équilibre écologique ? Peut-on et faut-il en réguler l'usage ? État des lieux scientifique et éthique d'une question brûlante.

Cancer : les molécules innovantes sont-elles trop chères ?

- **Éric Baseilhac,** directeur des Affaires économiques et internationales des entreprises du médicament.
- **Giovanna Marisco,** directrice de l'association Cancer Contribution.
- **Jean-Paul Vernant,** professeur émérite d'hématologie à la Pitié-Salpêtrière et auteur des recommandations pour le 3e plan cancer.

L'avènement de nouvelle thérapies, dites ciblées, a fait exploser le prix des molécules anticancéreuses. Un phénomène qui suscite de vives inquiétudes tant de la part de médecins que d'associations comme la Ligue contre le cancer. Cette dernière dénonce l'opacité des prix, pointe les laboratoires pharmaceutiques et demande que cette problématique du prix des médicaments soit au cœur du prochain G7 qui se tiendra fin mai au Japon. Le risque est de voir les patients ne plus pouvoir avoir accès aux traitements innovants. Une menace pèse aussi sur l'équilibre du système de santé.

18h30 - 19h45 // TABLES RONDES (en parallèle)

Intestin : les pouvoirs du microbiote sur notre santé

- **Marie-José Butel,** directrice du laboratoire Inserm Écosystème intestinal, probiotiques, antibiotiques, à Paris.
- **Anne-Marie Cassard,** chargée de recherche à l'Inserm, au laboratoire Inflammation et recrutement cellulaire dans l'obésité et les maladies du foie.
- **Francisca Joly,** gastro-entérologue au pôle des maladies de l'appareil digestif, à l'hôpital Beaujon de Clichy, auteur du livre *L'Intestin, notre 2e cerveau* (Marabout) (sous réserve).

Les bactéries qui peuplent nos intestins, notre microbiote, sont-elles la clé de notre santé ? C'est ce que semble montrer un nombre grandissant d'études, menées chez l'adulte, le prématuré ou les patients souffrant de maladies immunitaires ou d'obésité. Quel type de traitement, fondé sur les bactéries intestinales, peut-on attendre dans les années à venir ? Le soin porté à nos intestins pourra-t-il un jour permettre d'éviter des maladies chez les personnes en bonne santé ?

Comprendre le cerveau pour mieux apprendre à l'école

- **Éric Gaspar,** enseignant à Montpellier et fondateur du programme neurosup, pratiqué dans plus de 100 établissements en France (sous réserve).
- **Bérengère Guillery-Girard,** neuropsychologue, coauteur, avec Francis Eustache, du livre *La Neuroéducation* (Odile Jacob).
- **Caroline Huron,** psychiatre, chercheuse en sciences cognitives à l'Inserm. Fondatrice de l'association Le cartable fantastique.
- **Pierre-Marie Lledo,** directeur de recherche, unité perception et mémoire, Institut Pasteur.

Que peuvent apporter les neurosciences aux apprentissages et à l'éducation ? En partageant les progrès des connaissances sur la mémoire, l'attention ou encore les processus de maturation du cerveau, les scientifiques peuvent aider les pédagogues à adapter leurs stratégies d'enseignement. Les recherches en neurosciences permettent aussi de mieux comprendre les mécanismes des troubles de l'apprentissage (dyslexie, dyspraxie...) et ainsi de proposer les outils les plus adaptés aux élèves en difficulté.

L'informatique verte sera-t-elle bientôt une réalité ?

- **Elisabeth Dechenaux,** ingénieure de recherche développement durable chez Orange.
- **Denis Kaplan,** délégué général de la Fondation pour l'Internet Nouvelle Génération et membre du Conseil national du numérique.
- **Christophe Perron,** fondateur et président de Stimergy.
- **Francis Vivat,** ingénieur de recherche en informatique au CNRS.

Si le cloud était un pays, il serait le 5e consommateur mondial d'électricité. La façade immatérielle des nouvelles technologies cache un impact non négligeable sur l'environnement. La moitié de cet impact est due à nos smartphones et autres ordinateurs, tandis que l'autre est due aux infrastructures. Cependant, de nombreuses pistes sont explorées pour une informatique « verte », depuis l'éco-conception des appareils jusqu'au recyclage de la chaleur des centres de données. Arrivera-t-on demain à concilier les transitions numériques et écologiques ?

18h30 - 19h45 // CÉRÉMONIE DE REMISE DU PRIX DU CONCOURS CGD2

La 12e édition du concours Génération Développement Durable du magazine La Recherche est lancée ! Qui seront les lauréats ?

Des trois équipes d'étudiants et de lycéens qui auront présenté les projets les plus originaux, audacieux et ambitieux dans une démarche de développement durable. L'année dernière, le premier prix a été attribué à une appli destinée à mesurer la consommation d'eau de sa douche en temps réel.

▲ *Gerbert d'Aurillac.*

Au X^e siècle, Gerbert d'Aurillac, moine d'origine modeste, devient un savant majeur de son époque. Féru de mathématiques, il invente un outil de calcul qui introduira les chiffres arabes en Occident. Ce qui n'entravera pas son accession au trône pontifical.

Gerbert d'Aurillac, le pape des chiffres arabes

Par Michel Mitov, physicien

« *Un indigent, quelqu'un que ne soutenaient ni son lignage, ni sa fortune* », tels sont les mots qu'utilise un jour Gerbert d'Aurillac, surnommé « le savant Gerbert », dans une correspondance pour évoquer ses origines. Celui qui devint le premier pape français à l'aube de l'an mil eut un destin hors du commun.

Né en Auvergne entre 945 et 950, le jeune Gerbert est abandonné par ses parents vers l'âge de douze ans au monastère Saint-Géraud, désormais d'Aurillac, pour devenir bénédictin. Il fait suivre son prénom du nom de la ville abritant le couvent d'appartenance. Il y reçoit l'enseignement du trivium : la grammaire, la rhétorique et la dialectique. Les maîtres de Gerbert remarquent ses prédispositions exceptionnelles pour les études. Le supérieur décide de l'envoyer vers un établissement de plus grande envergure. C'est chose faite en 967, lorsqu'il est placé sous la protection du comte Borrell II de Barcelone faisant étape à Aurillac. Ce dernier l'emmène à Vich (aujourd'hui Vic), en Catalogne, et le confie à l'évêque de la ville, Hatton, grand érudit dans les disciplines du quadrivium – arithmétique, géométrie, astronomie et musique –, le second degré de l'enseignement médiéval.

Pendant trois ans, Gerbert étudie ces matières dans des traductions latines d'ouvrages arabes réalisées par les moines du monastère Santa Maria de Ripoll, à une journée de marche de Vich. L'Espagne est sous domination musulmane, à l'exception de la Catalogne reprise aux Arabes par les proches de Charlemagne en 801. Néanmoins, le savoir et l'œuvre des savants arabes d'Andalousie (la bibliothèque du calife de Cordoue contenait des milliers de volumes) sont durablement installés dans les monastères catalans.

En 970, Hatton et Borrell II se rendent à Rome pour négocier avec le pape l'émancipation de l'Église catalane. Gerbert les accompagne et les assiste dans la défense de leur cause. Ses connaissances font forte impression auprès de Jean XIII, qui le recommande au premier empereur du Saint-Empire romain germanique, Otton I^er, à la recherche de maîtres pour donner un renouveau culturel à son empire. Gerbert reste à Rome, où il est engagé comme précepteur du jeune Otton II. Il demeure un an dans la fonction, jusqu'aux noces d'Otton II dans l'église Saint-Pierre de Rome. Lors des festivités, il croise Gerannus, archidiacre de Reims et dialecticien de renom. Or Gerbert veut approfondir ses connaissances en dialectique et Gerannus désire se cultiver au quadrivium. L'échange est tout trouvé : en 972, Gerbert retourne en France et s'installe à Reims.

Alors qu'il est devenu directeur de l'école épiscopale en 973, son enseignement insiste sur les matières scientifiques. Les étudiants étrangers affluent à Reims. Sa réputation de professeur croît et se répand *« à travers les Gaules et l'Italie »*, témoignera son disciple Richer. Ses connaissances en astronomie sont sans équivalent en

AKG-IMAGES

France. Son entourage est impressionné par sa culture foisonnante et son talent pour concevoir et utiliser dans son enseignement toutes sortes d'instruments : orgue, globe terrestre, astrolabe, cadran solaire, nocturlabe pour connaître l'heure la nuit selon la position des étoiles, « bâton de Gerbert » pour déterminer à distance la hauteur d'un arbre ou d'une bâtisse.

Mais la plus grande innovation de Gerbert est à venir. Au IXe siècle, le mathématicien perse Al-Khwarizmi – dont la version latinisée du nom donnera le mot algorithme – avait rapporté d'Inde les chiffres dits « arabes ». En 825, son texte sur le « calcul selon les Indiens » avait lancé au Moyen-Orient et dans le califat de Cordoue leur utilisation pour les opérations. À l'époque, en Occident, on énumère en chiffres romains. Calculer est une épreuve. On utilise un auxiliaire sous la forme d'un abaque – un outil de calcul – fait de jetons identiques disposés sur des lignes horizontales parallèles tracées sur une table. Réaliser une addition est accessible, une soustraction délicate, une multiplication pénible, la division quasiment impossible. Gerbert initie ses élèves à un nouvel abaque, fruit de son invention, dont les jetons initialement neutres sont remplacés par des jetons marqués d'un chiffre arabe, de 1 à 9. Lorsque la ligne unité comporte six jetons, ils sont remplacés par un seul sur lequel est écrit « 6 » ; trois jetons de la ligne dizaine sont remplacés par un jeton marqué « 3 », etc. L'abaque de Gerbert est de maniement complexe mais permet enfin d'effectuer des divisions.

CINQ SIÈCLES D'AVANCE

Cet abaque signe l'apparition en Occident des chiffres arabes. Leur utilisation par Gerbert s'est cantonnée au marquage des jetons, bien que la numération arabe de base 10 emploie les dix chiffres plus la numération positionnelle. C'est-à-dire que la position de chaque chiffre dans le nombre informe sur son statut : dans « 762 » le « 6 » est lu comme une quantité de dizaines parce qu'il est dans la position des dizaines.

L'instrument de Gerbert n'est pas une simple variante de l'abaque classique, grec ou romain, mais bien une adaptation du calcul arabe se déroulant avec la numération positionnelle. Grâce à des colonnes, l'abaque de Gerbert rend possible un calcul sans recourir au zéro, qui est remplacé par un espace vide. Le zéro – qui n'apparaît nulle part chez Gerbert – fut un concept difficile à imposer parce qu'il s'agissait d'écrire un signe concret signifiant « rien » et ce rien, affolant, était la griffe du diable (lire encadré p. 80).

L'abaque de Gerbert arrive de nulle part… Quelle a été sa source d'inspiration ? Gerbert la gardera secrète, mais il a probablement découvert la numération indo-arabe lors de son séjour dans les monastères catalans. Après son départ de Catalogne, il aurait en fait caché beaucoup de son savoir. Le mathématicien et historien du calcul Alain Schärlig pense même qu'il a pu avoir connaissance des quatre opérations. Pourquoi alors ne pas promouvoir sans cérémonie le calcul écrit ? Il est peu probable qu'il ait eu peur de commettre pour lui-même un acte sacrilège en manipulant directement les symboles utilisés par les musulmans. Ce grand voyageur n'est pas homme à craindre de s'enrichir des idées du monde, et l'historien Pierre Riché fait observer que le dieu de Gerbert est davantage celui des philosophes et des savants. En favorisant la raison, Gerbert se démarque des fondamentalistes. Son désir •••

▲ *C'est grâce à Otton III, empereur des Romains, au centre sur cette enluminure du Xe siècle, que Gerbert d'Aurillac (à gauche) devient le pape Sylvestre II en 999.*

◀ *Le* Liber abaci *de l'Italien Fibonacci décrit, en 1202, l'emploi des chiffres arabes pour les calculs écrits. Mais, deux siècles plus tôt, Gerbert d'Aurillac utilisait déjà les chiffres arabes pour élaborer son outil de calcul.*

AKG-IMAGES -DR

▲ *Comment expliquer le parcours du moine Gerbert ? De folles hypothèses ont circulé au long des siècles. Sur cette enluminure du XV^e siècle, devenu pape, il pactise avec le diable.*

Une ascension qui alimente les fantasmes

Gerbert savait des choses ignorées de tous en Occident. Sa personnalité n'aura donc jamais cessé d'inspirer de folles rumeurs. Avait-il passé un pacte avec le diable ? Devint-il pape par sortilège ? Comment expliquer autrement la trajectoire hors norme du petit paysan ? Au XII^e siècle, le moine chroniqueur Hugues de Flavigny écrit que Gerbert est chassé d'Aurillac à cause de l'insolence de son comportement, pendant qu'un autre bénédictin, l'homme de lettres anglais Guillaume de Malmesbury, affirme qu'il n'est rien d'autre qu'un magicien. Au XV^e siècle, une gravure allemande montre Gerbert affrontant le diable. Une rumeur raconte que, en 1648, son tombeau aurait été ouvert par les autorités pontificales sous le prétexte de travaux à la basilique Saint-Jean-de-Latran, pour vérifier que le défunt n'a pas les pieds fourchus ! Même dans l'œuvre de Victor Hugo, Gerbert surgit étrangement : il est *« l'âme livrée aux sombres aventures »* dans *La Légende des siècles* et celui qui dialogue avec les oiseaux dans *L'Homme qui rit.* En 1960, Jacques Bergier et Louis Pauwels, maîtres du « réalisme fantastique », prétendent dans *Le Matin des magiciens* qu'il a reçu ses connaissances stupéfiantes des Neuf Inconnus – une société secrète millénaire dissimulant ses prétendus savoirs pour interdire à l'humanité d'en faire un usage méchant – lors d'un voyage aux Indes. Ils ajoutent qu'il dispose d'une tête de bronze parlante, un ordinateur primitif répondant par oui ou non à ses questions sur la politique et la chrétienté. Une machine bien entendu détruite à sa mort…

••• d'anticiper la réaction de contemporains hostiles à la contamination de leur culture par des signes profanes est une hypothèse plus crédible. Malgré cette précaution, les usagers de l'abaque de Gerbert se limiteront aux meilleurs calculateurs des monastères. Gerbert est arrivé avec une innovation trop forte pour son temps, et trop matérielle pour son cercle de théologiens : s'intéresser aux calculs, c'est se détourner de la spiritualité. Son esprit d'ouverture et sa culture sont excessivement avancés pour l'époque. Il est en quelque sorte, cinq siècles trop tôt, un homme de la Renaissance qui fait le relais entre les cultures arabe et occidentale, à l'instar d'Al-Khwarizmi entre les cultures indienne et arabe.

FIN STRATÈGE

L'Occident se familiarisera, bon gré mal gré, avec le calcul algorithmique ramené par des clercs ayant participé aux croisades du XI^e au XIII^e siècle. L'emploi des chiffres arabes, à titre opératoire, pour les calculs écrits, est décrit en 1202 dans le *Liber abaci* du mathématicien italien Leonardo Fibonacci. L'usage de l'abaque règne néanmoins en maître jusqu'à la Renaissance. Entre-temps, les abacistes se seront opposés aux algoristes. À partir du XV^e siècle, l'essor du commerce commande de calculer simplement et rapidement. Le conservatisme, pressenti par Gerbert, explique en partie la résistance séculaire à l'adoption des chiffres arabes : les chiffres romains sont les piliers de la civilisation dont les Occidentaux sont les héritiers. En France, l'abaque est banni de l'école et de l'administration à la Révolution.

Gerbert fut aussi un fin stratège mêlé à des intrigues. Mais pour lui, la politique doit être fondée sur l'honnêteté et l'utilité. Il a su garder d'excellentes relations avec Otton II et reste jusqu'à la fin l'ami de la dynastie des Ottoniens. En 987, Hugues Capet est sacré roi des Francs. Par son réseau de puissants et ses agissements, Gerbert a été un artisan discret mais majeur de l'accession des Capétiens au trône. Capet en fait son secrétaire. En 991, après de nombreux rebondissements, il devient archevêque de Reims, le deuxième personnage de France. En 998, Otton III demande au pape de nommer Gerbert archevêque de Ravenne. Un an plus tard, il obtient qu'il succède à Grégoire V pour devenir Sylvestre II, premier pape français. Il meurt en 1003 après quatre années de pontificat. Gerbert d'Aurillac n'est pas seulement le pape de l'an mil. S'il reste dans l'histoire, au contraire des papes de son époque, c'est pour sa personnalité savante si singulière. Non, le haut Moyen Âge ne fut pas un désert intellectuel pour les sciences, et des historiens nomment sans hésiter le X^e siècle « le siècle de Gerbert ». ■

Pour en savoir plus

■ Alain Schärlig, *Un portrait de Gerbert d'Aurillac,* Presses polytechniques et universitaires romandes, 2011.

■ Pierre Riché, *Gerbert d'Aurillac, le pape de l'an mil,* Fayard, 1987.

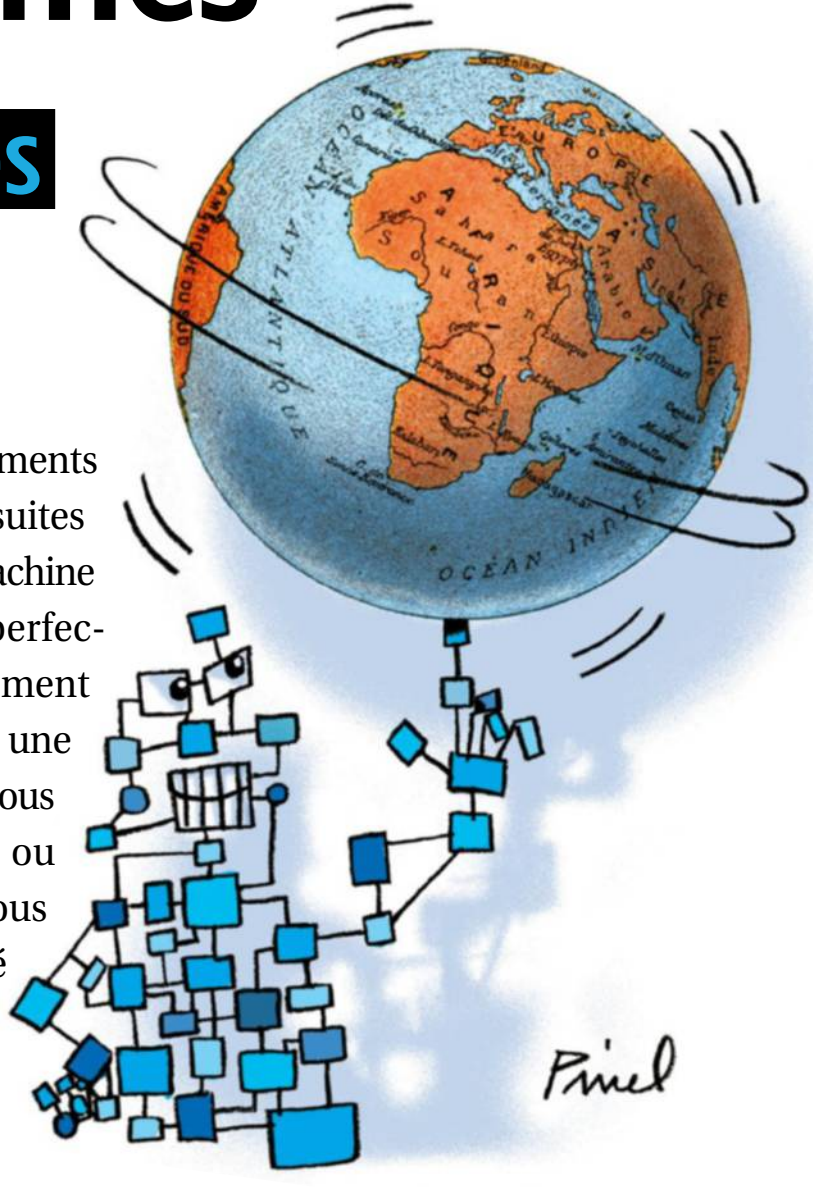
UNIVERSITÄTS BIBLIOTHEK, HEIDELBERG

idées

Matière à penser P. 82 | Débat P. 86 | L'œil du philosophe P. 88

Algorithmes

Futurs maîtres du monde ?



Autrefois limités à fournir des éléments de mesure, les algorithmes, ces suites d'instructions permettant à une machine de résoudre un problème, se perfectionnent. Dans notre environnement riche en ordinateurs, ils tiennent une place de plus en plus grande. S'ils nous aident à prendre des décisions ou à améliorer notre sécurité, ils nous interrogent sur le type de société qu'ils contribuent à façonner. Les algorithmes grignotent-ils, l'air de rien, notre liberté ?

ILLUSTRATION : HERVÉ PINEL

Matière à penser

Comment les algorithmes envahissent notre quotidien

Réseaux sociaux, management d'entreprise, politiques publiques… Les algorithmes investissent de plus en plus de domaines de la société. Une tendance qui fascine certains, attise les critiques des autres, mais surtout met en évidence le manque de connaissances du grand public sur le sujet.

Vincent Glavieux, journaliste

Connaissez-vous Deep Knowledge Ventures? Ce nom est celui d'une société de Hong Kong, qui investit dans des entreprises – en l'occurrence, celles qui mettent au point des médicaments luttant contre des maladies liées à l'âge ou des projets de médecine régénérative – en espérant un lucratif retour sur sa mise. Mais si cette entreprise a fait parler d'elle en 2014, ce n'est pas pour son activité. C'est parce qu'elle a pris une décision étonnante: nommer comme membre de son conseil d'administration… un algorithme!

Baptisé Vital, le programme possède, comme tous les autres membres du conseil d'administration, un vote sur les futurs investissements de l'entreprise. Pour prendre sa décision, il se fonde sur l'analyse de nombreuses données de la société dans laquelle Deep Knowledge Ventures envisage d'investir: son état financier, le type et le nombre d'essais cliniques qu'elle mène, les droits de propriété intellectuelle qu'elle possède (brevets, marques commerciales, etc.) ou encore les résultats de ses précédentes levées de fonds.

Un algorithme qui participe aux prises de décisions stratégiques d'une entreprise? L'exemple semble – pour le moment du moins – un cas isolé. Mais il est révélateur d'une tendance forte, qui s'accentue ces dernières années: les techniques de calcul et d'analyse des données se complexifient, et s'immiscent dans les moindres aspects de notre vie quotidienne. Bien évidemment, cette emprise croissante suscite de nombreuses interrogations, crée de nouveaux enjeux. Faut-il pour autant redouter le fait qu'un jour les algorithmes puissent devenir les maîtres du monde?

Les algorithmes sont un outil très ancien. Si le premier algorithme reconnu est celui établi par Euclide, vers -300 avant J.-C., pour calculer le plus grand commun diviseur, les recherches archéologiques montrent que les Babyloniens, qui peuplaient une région située dans l'Irak actuel, en comprenaient déjà le fonctionnement. La tablette d'argile «YBC 7289» («Yale Babylonian Collection n° 7289»), datée entre -1800 et -1600 avant J.-C. et aujourd'hui conservée à l'université Yale, aux États-Unis, en est un exemple: d'après les spécialistes, il s'agit de la plus ancienne représentation connue de la racine carrée de 2; un résultat qu'elle donne avec une précision de six décimales (1,414212, au lieu de 1,414213), grâce à l'utilisation d'un algorithme d'approximation (1).

Aujourd'hui, les algorithmes se retrouvent partout. Les plus répandus sont aussi ceux qui ont le fonctionnement *«le plus primitif»*, juge Serge Abiteboul, directeur de recherche à Inria, professeur affilié à l'École normale supérieure de Cachan. Parmi eux figure le PageRank du moteur de recherche Google, qui référence les pages web en fonction du nombre de fois où des utilisateurs ont cliqué dessus, ou l'algorithme de Facebook qui, jusqu'à l'année dernière, déterminait la place d'un post dans le fil d'actualité de ses utilisateurs en fonction du nombre de mentions «j'aime» (les «like»), de commentaires et de partages avec les autres membres du réseau social.

Depuis un an, l'algorithme du site créé par Mark Zuckerberg prend aussi en compte les préférences des utilisateurs, notamment en se fondant sur le temps qu'ils passent à regarder chacun des contenus. Une évolution qui vise à mieux épouser leurs demandes… mais aussi à mieux

Uber utilise son programme de calcul pour exercer sur les chauffeurs le même genre de contrôle managérial qu'un être humain

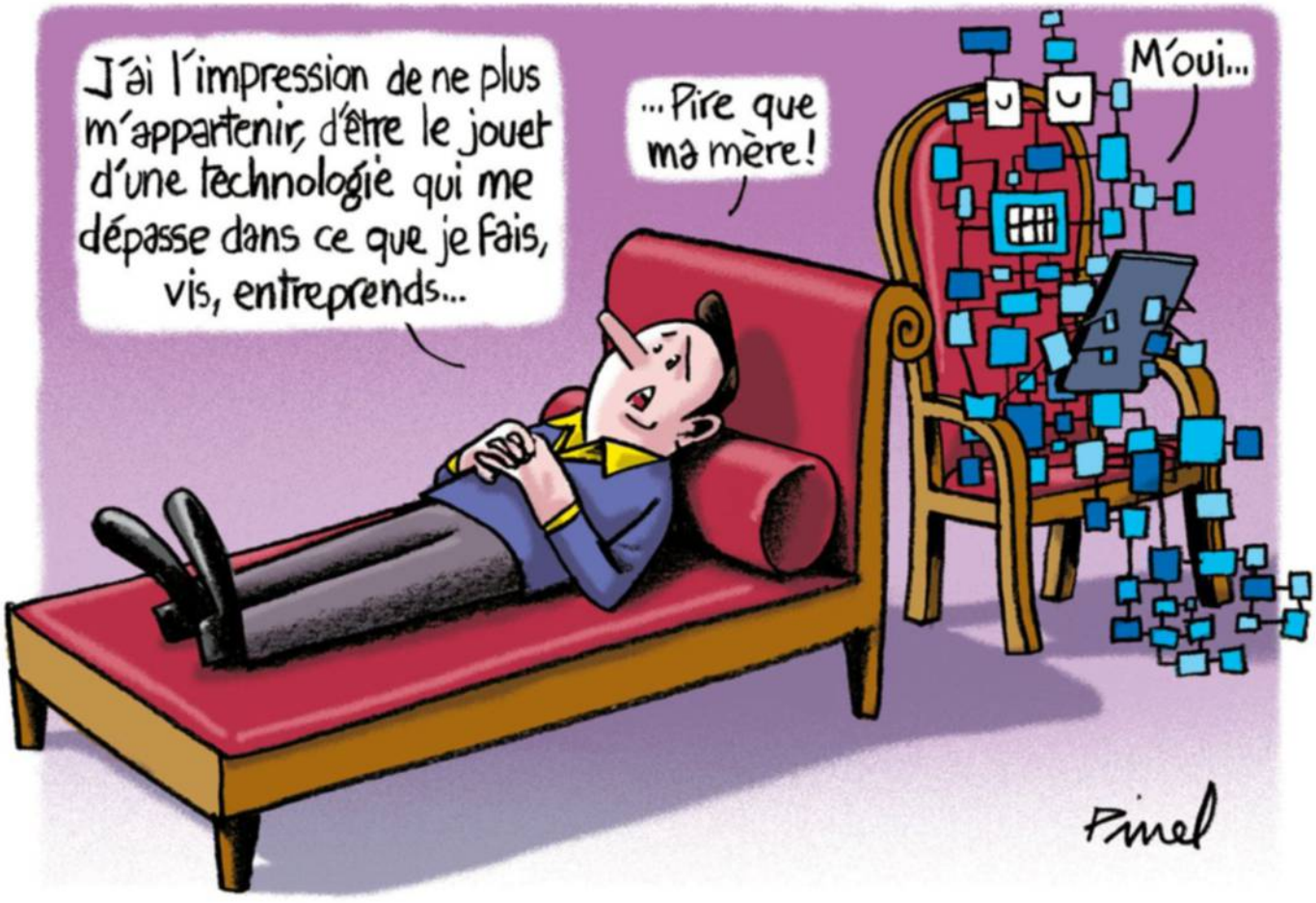

J'ai l'impression de ne plus m'appartenir, d'être le jouet d'une technologie qui me dépasse dans ce que je fais, vis, entreprends...
...Pire que ma mère!
M'oui...
Pinel

ILLUSTRATION : HERVÉ PINEL

mettre en valeur les partenaires commerciaux de Facebook, via la technique de ciblage publicitaire. Cette méthode de marketing digital s'appuie en effet beaucoup sur les recherches des internautes – donc ce qui est censé les intéresser –, pour leur proposer des produits ou des sites dans le même champ.

IDIOTS OU EXPERTS

« On parle ici d'algorithmes peu sophistiqués, idiots et intrusifs, reprend Dominique Cardon, sociologue au laboratoire des usages d'Orange Labs, professeur associé de l'université de Marne-la-Vallée (lire p. 86). *D'ailleurs, leur efficacité reste toute relative. Ce problème est en partie dû au fait que les données qu'ils traitent sont de natures variées – un souci qui n'existe pas pour des sites comme Spotify, bien plus efficaces dans leurs conseils car ils traitent de données homogènes : en l'occurrence, les goûts musicaux d'une personne.»*

À côté de ces algorithmes basiques, il existe des algorithmes plus élaborés, complexes, qui cherchent à apporter une expertise, voire remplacent carrément la décision humaine. Ces algorithmes, on les retrouve dans la gestion des lignes de métro – la ligne 14 du réseau parisien, qui est entièrement automatique, par exemple – ou en médecine, pour les diagnostics médicaux. Leur domaine d'application privilégié reste néanmoins la finance, où ils sont utilisés à des tâches qui ne requièrent pas nécessairement d'intervention humaine. Il est loin, en effet, le temps où les transactions boursières se faisaient à la main. Ce système cède de plus en plus la place à la gestion systématique par ordinateur et au trading algorithmique. Ici, les différents aspects de l'ordre de transaction, tels que l'instant d'ouverture ou de clôture, le prix ou le volume de l'ordre, sont décidés par des algorithmes – il en existe des dizaines, qui possèdent tous un nom évocateur : Iceberg, Sumo, Shark, etc. (2). Ce qui n'empêche pas des défaillances, comme lorsqu'un algorithme dit de « trading à haute fréquence » a provoqué la chute brutale du cours de la Bourse de Wall Street, et la disparition de près de 860 milliards de dollars de capitalisation boursière (lire p. 84).

Et ce qui est vrai pour des processus automatisables l'est aussi, de plus en plus, dans d'autres domaines où l'on penserait pourtant que les hommes sont incontournables. Ainsi, le management des entreprises s'ouvre lui aussi aux algorithmes. Deux chercheurs américains en sciences sociales, Alex Rosenblat, de l'institut de recherche Data & Society, et Luke Stark, de l'université de New York, ont par exemple montré récemment comment la société Uber, qui développe et exploite des applications mobiles pour mettre en relation ses utilisateurs avec des conducteurs, se sert de son programme de calcul pour exercer sur les chauffeurs le même genre de contrôle managérial qu'un être humain. Parmi les paramètres de leur algorithme figurent des indicateurs de performance, des systèmes de planification ou encore une tarification évolutive, qui varie en fonction de la note de satisfaction attribuée au conducteur (3).

Le domaine de la recherche scientifique lui-même n'est pas à l'abri. Face au •••

Matière à penser

> **« Le risque [des algorithmes] est qu'ils vous enferment dans des territoires intellectuels de plus en plus étroits »**
> **Serge Abiteboul,** directeur de recherche à Inria

••• développement de l'analyse des données massives – le Big Data –, certains se posent ainsi la question de savoir si cette évolution ne va pas remettre en cause la méthode scientifique traditionnelle, fondée sur les hypothèses et les modèles d'une part, et l'expérimentation pour confirmer ou infirmer des hypothèses d'autre part.

Autre domaine visé par cette logique algorithmique : la politique. Dans l'ouvrage collectif *Beyond Transparency,* les auteurs – tous impliqués dans des projets appliquant l'open data à la politique – décrivent ainsi les bénéfices que nous pourrions tirer de méthodes de gouvernement dérivées de ces outils de calcul : plus de réactivité, plus de pragmatisme, plus d'efficacité aussi. Pour illustrer leur propos, ils mentionnent entre autres la ville de New York où, selon eux, la création d'une cellule d'analytique prédictive a permis à la municipalité d'améliorer sensiblement la lutte contre la fraude et d'optimiser de nombreuses politiques publiques, notamment l'inscription des enfants dans les établissements d'enseignement secondaire de la ville (4).

Mais parmi tous les projets exploitant des algorithmes, un se détache par son ambition universelle : il s'agit du projet Ethereum, lancé en novembre 2013 et opérationnel depuis juillet 2015. Ses deux cofondateurs, Vitalik Buterin et Joseph Lubin, visent par son biais à étendre l'utilisation des programmes de calcul à tous les pans de la société, selon un même mode de fonctionnement – d'abord dans la finance, puis dans l'Internet des objets, dans la musique, dans la location de voitures, etc. Concrètement, le projet Ethereum est un système de transactions à l'échelle mondiale. Son architecture est celle d'un réseau pair à pair, c'est-à-dire qu'il permet l'échange et le partage direct de fichiers entre ordinateurs, sans intermédiaire. Dans ce système, des algorithmes, dits « de consensus », régissent le fonctionnement : ils ont pour rôle de garantir la fiabilité des transactions (5).

CALCULS BIAISÉS

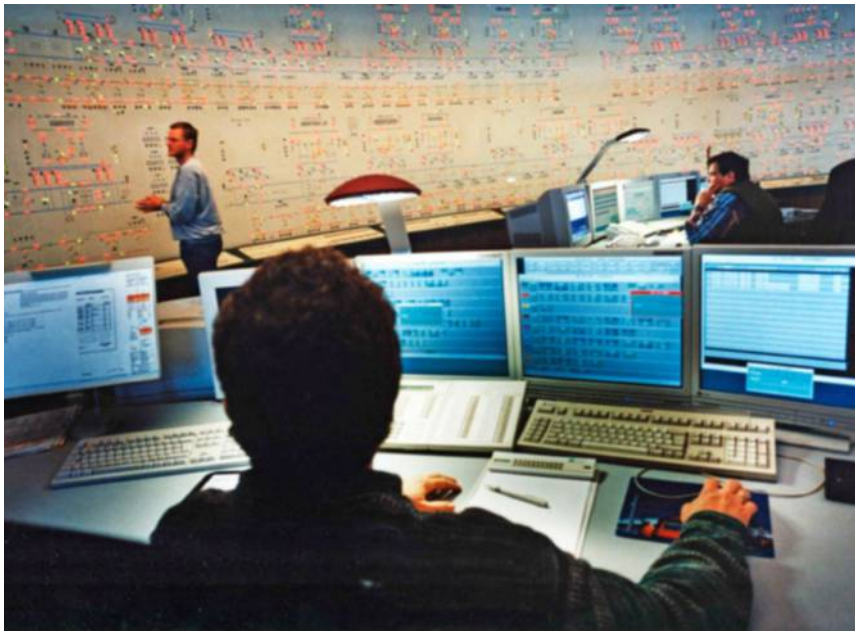
On le voit, non seulement les algorithmes s'immiscent dans tous les espaces de notre vie quotidienne, afin de nous dégager de tâches non essentielles, mais ils s'infiltrent jusque dans nos processus de décision, et peuvent prendre des aspects hégémoniques. Faut-il pour autant en avoir peur ? Pour Buterin et Lubin, la réponse est clairement non. Les deux hommes sont convaincus de la nature bienfaisante de leur projet, et des algorithmes de manière générale. Lors d'une présentation à Genève, en février de cette année, Joseph Lubin a ainsi défendu Ethereum en mettant en avant ses capacités à *« court-circuiter les constructions politiques et légales, qui reposent sur la subjectivité et peuvent conduire à concentrer du pouvoir »* et en le définissant comme *« un substrat pour construire des systèmes économiques, sociaux et politiques globaux qui soient transparents, configurables de manière privée, profondément sécurisés, non censurables, non répudiables, et nativement interopérables »*. Autrement dit : il ne faut pas redouter Ethereum, mais l'accueillir comme un moyen de lutter contre les discriminations, un outil profondément égalitaire et émancipateur.

Mais tout le monde ne pose pas le même regard bienveillant sur cette emprise croissante des algorithmes. Les doutes portent par exemple sur leur loyauté : rendent-ils

Quand un algorithme provoque un krach boursier éclair

En quelques minutes, le 6 mai 2010, la Bourse de New York s'effondre : de -2 %, son cours passe à -10 %. Le cours se redresse quelques minutes plus tard mais le mal est fait : environ 860 milliards de dollars de capitalisation boursière ont disparu. Très rapidement, les autorités fédérales de régulation des marchés américains, la Securities and Exchange Commission et la Commodity Futures Trading Commission, sont chargées d'enquêter sur ce qui s'est passé. Dans le rapport qu'elles rendent en octobre de la même année, les agences mettent en cause un courtier et… les algorithmes de trading à haute fréquence (1). D'après elles, le courtier aurait donné, à travers son programme informatique, un ordre de vente de 4,1 milliards de dollars. L'algorithme était paramétré pour vendre 9 % du volume réalisé à la minute précédente, sauf qu'il n'avait aucune indication de prix ou de temps pour effectuer cette tâche. Résultat, il a accompli en vingt minutes une opération qui, normalement, se déroule sur plusieurs heures. L'extrême rapidité de la manœuvre a surpris, provoquant un effet domino : d'autres algorithmes de courtage ultrarapides se sont mis, mécaniquement, à vendre en masse eux aussi, sans qu'il y ait d'acheteurs, ce qui a fait plonger les cours brutalement.

(1) Collectif, « Findings regarding the market events of May 6th, 2010 », http://tinyurl.com/SEC-and-CFTC-report



▲ *Pour gérer le trafic du métro parisien, le personnel de la RATP, ici dans une salle de contrôle, fait déjà confiance aux algorithmes.*

JUSTIN JIN / COSMOS

le service qu'ils prétendent offrir, ou pas ? Pour Serge Abiteboul, les risques liés aux algorithmes sont de trois ordres. *« Premièrement, ils peuvent être injustes ou, plus exactement, ils peuvent reproduire une injustice si les concepteurs y introduisent des biais,* explique-t-il. *Par exemple, il serait injuste d'utiliser un ensemble de données sur la criminalité, dans lequel certains quartiers sont sous-représentés, ou de biaiser un calcul en utilisant les valeurs de certaines variables cachées, comme l'origine ethnique, reconstruites pour l'occasion. De tels biais peuvent refléter les intérêts commerciaux, les préférences politiques, religieuses, ou autres des concepteurs des algorithmes. Qu'ils soient intentionnels ou pas, ils peuvent être immoraux, voire illégaux. »*

Le deuxième risque est celui de l'opacité : les algorithmes sont souvent des dispositifs opaques, qui accèdent à nos données – parfois très personnelles – sans que l'on sache vraiment ce qu'ils en font, ni comment. *« À ce titre, les "boîtes noires" adoptées l'année dernière dans la loi sur le renseignement sont un exemple particulièrement frappant de ce qu'il faut absolument éviter »,* estime le directeur de recherche à Inria. La législation française prévoit en effet désormais, pour les services de renseignement, la possibilité d'imposer des dispositifs d'analyse automatique des données – ce qu'on appelle les boîtes noires – dans les réseaux des fournisseurs d'accès et de certains grands sites internet (6). Ces dispositifs sont censés permettre de détecter des comportements suspects de potentiels terroristes en croisant ces données à l'aide d'algorithmes. Sauf que les détails et le périmètre de cette détection automatique sont encore très vagues.

APPRIVOISER LA TECHNOLOGIE

Enfin, il y a le risque que les algorithmes encouragent l'uniformité. *« Les algorithmes de recommandation qu'utilisent les sites internet (d'information, de pages web, de films, etc.) donnent en priorité les informations les plus populaires, celles que vous avez l'habitude de voir,* commente Serge Abiteboul. *Le risque, c'est donc qu'ils nous poussent à occulter une grande partie des choix possibles, et qu'ils nous enferment dans des territoires intellectuels de plus en plus étroits. »*

Alors, faut-il s'inquiéter de la (toute) puissance des algorithmes ? *« Tous les risques que je viens d'énumérer ne sont pas des défauts intrinsèques à cette technologie,* termine le chercheur. *Tout dépend de la manière dont nous, êtres humains, les concevons et les utilisons, et cela s'applique y compris aux programmes les plus complexes, dont le fonctionnement ressemble de plus en plus à celui d'un être humain, comme la voiture autonome. »* Ce qui implique selon lui de mettre en place des instances indépendantes, chargées de contrôler que les algorithmes sont utilisés de manière responsable. Pour David Monniaux, directeur de recherche dans l'unité mixte Verimag, spécialisée dans la conception d'outils entrant dans le développement de systèmes embarqués, les peurs – comme les espérances – liées aux algorithmes sont surtout révélatrices d'une *« pensée magique à l'œuvre »*. Autrement dit, elles reflètent le manque de connaissances du grand public sur le sujet, ce qui empêche d'en faire *« une analyse objective et informée »*. Dans ce contexte, les chercheurs ont, selon lui, un rôle important à jouer auprès de la population : charge à eux de démystifier les argumentations trompeuses et les concepts présentés comme mystérieux. De cette manière, assure-t-il, nous parviendrons à apprivoiser les algorithmes, comme nous l'avons fait avec chaque grande rupture technologique, comme l'électricité par exemple. ■

(1) E. Robson et D. Fowler, *Historia Mathematica, 25,* 366, 1998.

(2) Alexandre Laumonier, *6,* Zones sensibles, 2013.

(3) A. Rosenblat et L. Stark, *S.S.R.N.,* http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2686227, 2015.

(4) Brett Goldstein et Lauren Dyson (dir.), *Beyond Transparency,* 2013. http://beyondtransparency.org/,

(5) https://www.ethereum.org

(6) Collectif, Code de la sécurité intérieure, article L851-3, http://tinyurl.com/article-L851-3, 2015.

Débat

Faut-il réguler l'usage des algorithmes ?

Face à l'expansion des algorithmes, deux camps s'opposent : les partisans de la régulation, qui avancent les dangers de ces techniques de calcul, et ceux qui pointent les bénéfices qu'ils apportent, et réclament simplement plus de transparence sur leur fonctionnement.

Propos recueillis par Vincent Glavieux

OUI

DOMINIQUE CARDON

Sociologue au laboratoire des usages d'Orange Labs et professeur associé de l'université de Marne-la-Vallée, auteur du livre *À quoi rêvent les algorithmes* (Seuil).

Les algorithmes prennent une place de plus en plus grande dans nos vies, comme d'autres technologies avant eux. Ils hiérarchisent l'information, devinent ce qui nous intéresse, sélectionnent les biens que nous préférons et s'efforcent de nous suppléer dans de nombreuses tâches. Ils sont donc plus que des outils techniques : nous les concevons, mais en retour ils nous construisent, ils bouleversent le monde dans lequel nous évoluons, ils le « préstructurent ». Il est donc important de comprendre, de débattre et de critiquer la manière dont nous programmons les calculateurs, car de cela dépend le type de société qu'ils créeront.

Si la régulation des algorithmes devient une question centrale, c'est en partie parce qu'ils peuvent entraîner, parfois sans intention, des discriminations. Une chercheuse en informatique afro-américaine de l'université Harvard, Latanya Sweeney, en a fait l'expérience. En tapant son nom dans le moteur de recherche de Google, elle a vu apparaître dans les premières propositions une publicité d'un service

NON

MOULOUD DEY

Directeur business solutions chez SAS, entreprise d'analytique informatique et statistique.

C'est un fait : les algorithmes font désormais partie intégrante de notre société, ils sont inscrits dans nos vies. Pour autant, il ne faut pas en avoir peur, car ils nous rendent de multiples services. Prenons le cas de nos comptes bancaires en ligne, ou celui de nos conversations téléphoniques. Qui calcule le solde de notre compte, et vérifie qu'il est correct ? Qui permet aujourd'hui de mettre en relation téléphonique deux personnes, ou régit le parcours de notre voix à travers le réseau ? Des algorithmes.

Les exemples que je viens de mentionner concernent des algorithmes techniques, qui nous servent au quotidien sans que nous nous en rendions compte, et ce depuis plusieurs décennies déjà. Il ne nous viendrait pas à l'esprit de remettre en cause leur utilité. Notre méfiance est plutôt dirigée contre les algorithmes plus évolués. Or, eux aussi ont des vertus.

La société pour laquelle je travaille commercialise des algorithmes dits « prédictifs ». Ils sont utilisés par exemple par la brigade des sapeurs-pompiers de Londres – qui est la cinquième du monde en termes d'effectifs. L'objectif est de l'aider à cibler les sites dangereux afin de prévenir les risques associés à des incendies, des effondrements, des explosions. Le modèle a été conçu de façon à calculer pour chaque site, à partir des données récoltées sur soixante critères (densité de population, type d'activité dans la zone, niveau de richesse, catastrophes précédentes, etc.), quelle est la probabilité qu'une catastrophe y survienne.

Les sapeurs-pompiers peuvent donc prédire les zones à contrôler en priorité, ce qui n'est pas un mince avantage,

DR – NICOLAS CARDONA

de consultation en ligne permettant de vérifier si elle avait un casier judiciaire. Or les noms de ses collègues blancs étaient, eux, associés prioritairement avec des offres commerciales (retrouvailles avec des amis d'enfance, robes de mariée, etc.) (1). Évidemment, l'algorithme n'avait pas d'intention discriminatoire : il ne comporte pas de règle lui demandant de détecter la couleur de peau d'une personne. Néanmoins, en s'appuyant sur les comportements des autres internautes, il a contribué à la reproduction d'inégalités et de discriminations.

D'autres algorithmes ne se contentent pas de cela, ils créent leurs propres inégalités, qui s'ajoutent à celles existantes. C'est le cas de tous ces outils de calcul qui explorent les fichiers de données, afin de différencier les tarifs en fonction des profils : les clients intéressants seront récompensés par des prix attractifs, ceux qui ne le sont pas – parce qu'ils ne sont pas fiables, parce qu'ils sont en mauvaise santé, parce que leurs revenus ne sont pas assez élevés – n'accéderont pas à un bon taux de crédit, aux informations, etc.

Autre aspect qui demande toute notre vigilance : celui de la loyauté des algorithmes. Il faut faire en sorte de vérifier que les algorithmes respectent bien ce principe. En clair, les plates-formes qui les exploitent doivent expliciter ce qu'elles font, et démontrer qu'elles ne trompent pas les utilisateurs, qu'il n'existe pas de décalage entre le service qu'elles prétendent rendre, et la réalité de ce qu'elles offrent : par exemple, je dois être en mesure de vérifier que le site de vente en ligne Amazon me recommande bien des livres en se fondant sur des utilisateurs au profil d'achat similaire au mien, et non des ouvrages que le site doit promouvoir (à cause d'accords commerciaux).

Il faut, pour contrôler tout cela, mettre en place des instances de régulation, qui étudient tous les sujets sensibles liés aux algorithmes. Cette *task force* doit aussi être chargée d'évaluer, en toute indépendance, les « boîtes noires » de ces algorithmes et leurs éventuels manquements (intérêts cachés, déformations clandestines, favoritismes). On peut aussi imaginer la création de comités de déontologie indépendants des plates-formes qui exploitent les algorithmes. Plus prosaïquement, on peut inventer tout un tas de ruses pour contrer le côté intrusif des algorithmes, ce que certains ont déjà fait. Que l'on pense par exemple à l'outil AdBlock, qui permet de bloquer les publicités personnalisées sur son navigateur, ou aux techniques dites d'« offuscation ». Celles-ci dissimulent en effet le sens ou l'importance d'une information, sans annuler sa visibilité, en la noyant dans une masse d'informations non pertinentes de même type, qui la rende plus difficile à trouver sur un moteur de recherche (2). ■

(1) L. Sweeney, *ACM Queue, 11*, 10, 2013.

(2) F. Brunton et H. Nissenbaum, *Obfuscation : A User's Guide for Privacy and Protest,* The MIT Press, 2015.

---

quand on sait que le territoire de Londres s'étend sur plus de 1 500 kilomètres carrés !

Et ce n'est qu'un exemple. Un algorithme, aux États-Unis, évalue les risques d'attentat bioterroriste en s'appuyant sur des données récoltées auprès de 6 000 vétérinaires : il repose sur le principe selon lequel, en cas de diffusion d'une maladie, les animaux seront les premiers touchés, ce qui permettra de donner l'alerte pour circonscrire son développement chez les êtres humains. Un autre modèle, dans les ports de Corée du Sud, aide les douaniers à identifier les containers les plus susceptibles de contenir des marchandises non déclarées, contrefaites ou illicites.

Certes, en tant que citoyen, je me pose des questions, en particulier sur les algorithmes qui s'intéressent à nos données personnelles. Je ne voudrais pas non plus qu'on laisse les algorithmes prendre toutes les décisions à notre place : la régulation par les algorithmes, dont se félicite par exemple l'éditeur Tim O'Reilly (1), c'est ce qu'il faut éviter à tout prix. Mais je ne crois pas qu'il faille imposer de réglementation a priori sur les algorithmes, comme on le fait pour les médicaments, où toute nouvelle molécule est soumise à l'approbation de l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé avant de pouvoir être mise sur le marché. Cela risquerait de tuer toute créativité. Plutôt qu'une telle réglementation, je préconise la transparence sur leur fonctionnement. Il me semble en effet plus judicieux de faire en sorte que les citoyens et les consommateurs soient informés de manière honnête sur la manière dont ces outils utilisent leurs données personnelles, et comment ils arrivent à leurs résultats. Ainsi, la société sera plus à même d'évaluer la dangerosité d'un algorithme et, dans les cas où elle constatera des dérives, d'agir pour que l'algorithme incriminé soit modifié, voire invalidé, et que ses concepteurs soient sanctionnés. ■

(1) Brett Goldstein et Lauren Dyson (dir.), *Beyond Transparency, Code for America,* 2013. http://beyondtransparency.org/

L'œil du philosophe

Les algorithmes peuvent-ils tout résoudre ?

Établir la frontière entre les problèmes calculables et les problèmes non calculables a longtemps constitué un enjeu central. Il est aujourd'hui remplacé par les interrogations sur la complexité des algorithmes, et leur rapidité d'exécution.

Jacques Dubucs, philosophe des sciences

Un algorithme est une recette conduisant à son but sans qu'on n'ait à faire preuve d'inventivité. Il en existe pour allumer les cigarettes (en l'absence de vent, frotter une allumette et l'approcher de l'extrémité libre du cylindre de papier tandis qu'on aspire par l'autre extrémité). Il n'y en a pas pour savoir s'il conviendrait, en France, de repenser l'action publique (quelque chose nous dit que ce ne serait pas une mauvaise chose, mais comment s'y prendre pour en être tout à fait certain ?). Ces deux exemples suggèrent qu'il y a des algorithmes là où les questions sont précisément posées (une cigarette est allumée ou non). Et qu'il n'y en a pas là où les questions sont vagues et indéterminées (quand faut-il « repenser l'action publique » et qu'est-ce au juste que « repenser » ?). Mais en vérité, les choses ne sont pas ainsi. C'est ce que les lignes qui suivent vont s'efforcer d'expliquer.

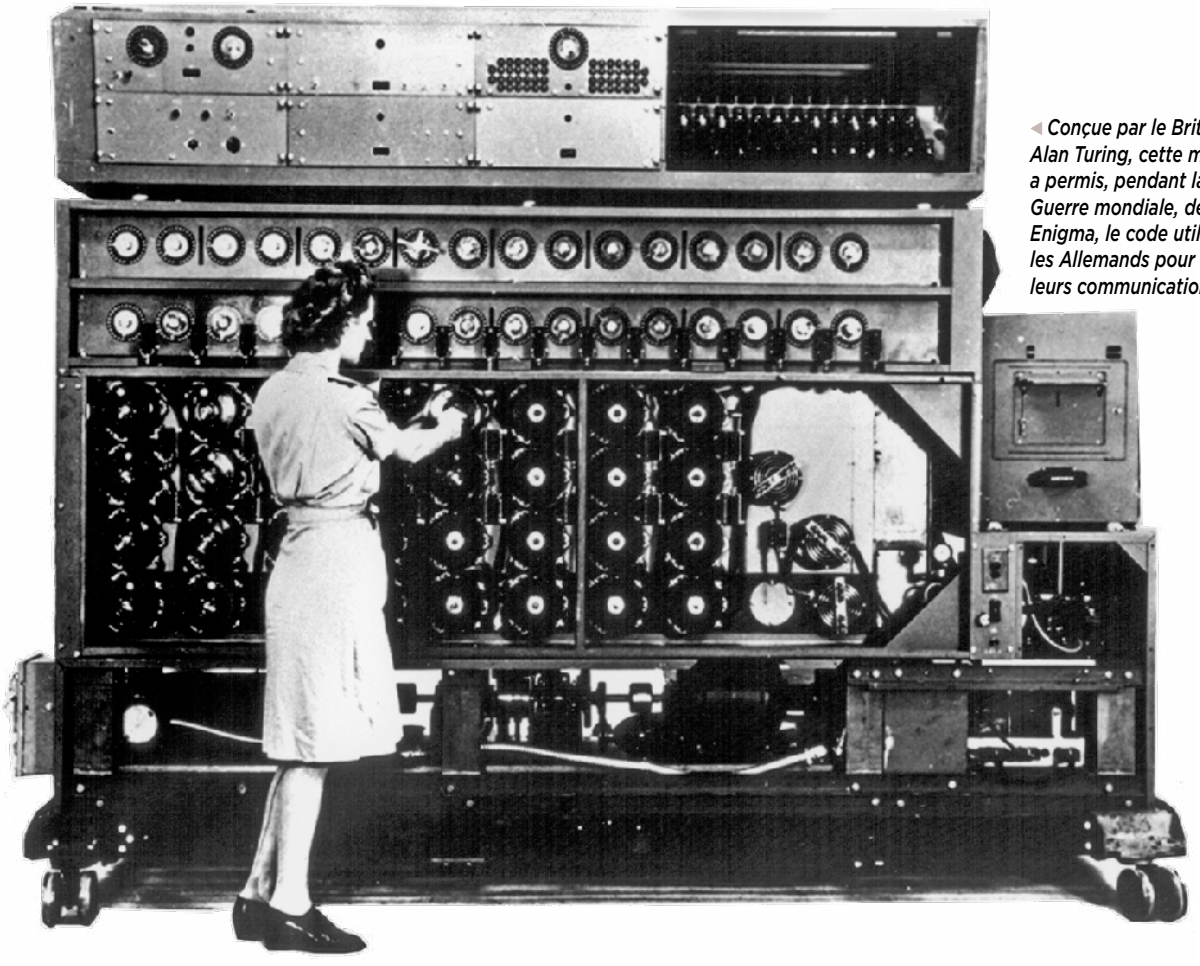
On fait parfois remonter les algorithmes à l'algébriste persan Al-Khwârizmî, mort à Bagdad vers 850, et dont le mot « algorithme » dérive. Il n'en est rien. Les Grecs avaient déjà, sous un autre nom, des algorithmes parfaitement définis. L'un des plus connus est le « crible d'Eratosthène », du nom du philosophe et mathématicien qui, au III^{e} siècle avant notre ère, dirigeait la bibliothèque d'Alexandrie. Cet algorithme, encore en usage aujourd'hui sous des formes plus raffinées, sert à déterminer si un nombre entier n est premier ou non. Il consiste à essayer de diviser n par les entiers successifs k pris à partir de 2, jusqu'à ce que l'une des deux situations se réalise : soit on trouve une division qui « tombe juste ». k est alors un diviseur de n, qui n'est donc pas premier, et on s'arrête là. Soit, à force d'incrémenter k, on arrive à une valeur de k égale à n. Dans ce cas, on s'arrête aussi, avec cette conclusion : puisqu'il est impossible que la division d'un entier par un autre plus grand que lui « tombe juste », c'est que n est premier.

L'important, c'est que l'opération, dans tous les cas, s'arrête. Que le verdict soit négatif (l'entier n'est pas premier), ou positif (il l'est), elle conduit à une décision en un nombre fini d'étapes. Les notions comme « être un nombre pair » ou « être un nombre premier » sont ce qu'on appelle des notions décidables : on peut leur associer des algorithmes conduisant à statuer sur le fait qu'un objet pertinent les satisfait ou non. Bien entendu, ces notions ne se limitent pas au règne des mathématiques : « être une carte Navigo valide » est un concept décidable, et l'algorithme qui, appliqué à des rectangles de plastique, délivre un verdict positif (le portillon s'ouvre) ou négatif (il reste bloqué) est exécuté des milliers de fois chaque matin dans les transports parisiens.

Une chose est d'être convaincu qu'un problème n'aura pas de solution, une autre est de démontrer qu'on a raison de l'être

ASYMÉTRIE ENTRE OUI ET NON

Les choses commencent à devenir intéressantes lorsqu'on se demande, un problème étant donné, s'il existe un algorithme pour le résoudre ou bien, un concept étant proposé, s'il est ou non décidable. On constate alors une remarquable asymétrie entre les réponses « oui » et « non ». De quoi s'agit-il ? Prenez une question de capacité, caractéristique de cette asymétrie : êtes-vous capable de soulever 100 kilogrammes ? Peut-on construire, à la règle et au compas, un carré de surface équivalente à celle d'un cercle donné ? Peut-on construire, toujours



Conçue par le Britannique Alan Turing, cette machine a permis, pendant la Seconde Guerre mondiale, de casser Enigma, le code utilisé par les Allemands pour crypter leurs communications.

NATIONAL SECURITY AGENCY/SPL/COSMOS

à la règle et au compas, un cube de volume double d'un cube donné (c'est le « problème de Délos », posé par les sophistes au VI^e siècle avant J.-C., dans lequel il s'agissait de rendre à Apollon un hommage renouvelé en lui construisant un autel de forme cubique deux fois plus volumineux que l'ancien) ? Dans la réponse à ces trois questions, l'asymétrie est la règle : si vous le faites, c'est que vous pouviez le faire, mais, si vous ne le faites pas, ceci ne signifie pas que vous ne pourrez jamais y arriver. Peut-être encore un effort, encore un essai, et vous parviendrez à soulever les haltères que pour l'heure vous n'arrivez pas à arracher du sol, ou à trouver une nouvelle construction géométrique qui va résoudre le problème pour le moment resté insoluble.

L'idée selon laquelle une réponse négative pourrait être apportée à des questions de ce type germe très tard, vers la fin du XVIII^e siècle, et elle est probablement une caractéristique de la science moderne. À cette époque, les gens commencent à se dire que des tentatives avortées pendant deux mille ans s'expliquent peut-être par la vanité de leur objectif. En 1775, l'Académie royale des sciences décide ainsi qu'elle n'ouvrira plus les lettres de quadrateurs ou d'inventeurs de machines à mouvement perpétuel, au motif d'*« une longue expérience, qui a suffi pour* [la] *convaincre du peu d'utilité qui résulterait pour les Sciences de l'examen de toutes ces prétendues solutions »* (1).

NOTION DE CALCULABILITÉ

Toutefois, une chose est d'être convaincu qu'un problème n'aura pas de solution, une autre est de démontrer qu'on a raison de l'être. Nous devons la première de ces démonstrations à Évariste Galois. Le mathématicien français établit qu'à partir du cinquième degré, il est inutile de chercher à résoudre des équations algébriques « par radicaux », c'est-à-dire au moyen d'un nombre fini d'opérations élémentaires sur ses coefficients. Inutile, donc, de chercher à procéder comme on le fait pour le second degré, avec la recette bien connue pour trouver les racines de l'équation $ax^2 + bx + c = 0$: en calculer le discriminant $\Delta = b^2 - 4ac$ puis, s'il est positif, écrire les solutions $(-b \pm \sqrt{\Delta})/2a$.

Au prix d'un travail mathématique profond, Galois montre que les seules équations ainsi résolubles sont celles dont les racines satisfont certaines propriétés de structure, généralement absentes à partir du degré 5. Au-delà, pour résoudre une équation, inutile de chercher une recette consistant à combiner ses coefficients : il est démontré qu'il n'y en a pas.

Pour ce qui est de la question générale de savoir si un problème donné possède une solution algorithmique, l'asymétrie entre les réponses « oui » et les réponses « non » prend la tournure suivante. Si vous avez trouvé un algorithme pour résoudre votre problème, c'est qu'il en existe un. En revanche, pour établir qu'il n'y a pas d'algorithme pour exécuter une tâche donnée, l'intuition ne suffit pas. Il faut formaliser les choses. Ceci est assez normal, si l'on songe qu'un résultat d'indécidabilité ou d'incalculabilité algorithmique a la portée universelle d'un principe de thermodynamique : aucune évolution technologique ne donnera ni le mouvement perpétuel ni la résolution par algorithme d'un problème démontré insoluble par ce biais. •••

••• Le travail conséquent qui a permis d'établir que certains problèmes n'ont pas de solution algorithmique a été effectué au milieu des années 1930. Au terme de l'année 1936, *annus mirabilis* pour la théorie des algorithmes, nous sommes dans la situation suivante. D'une part, on a trouvé une caractérisation « absolue » de la notion de calculabilité par algorithme. Un grand nombre de logiciens éminents essaient de caractériser la notion d'algorithme, et ils s'y prennent tous de manière très différente (celle du mathématicien britannique Alan Turing, aujourd'hui la plus connue, n'en est qu'une parmi d'autres). Or, les fonctions calculables par les algorithmes ainsi diversement caractérisés s'avèrent les mêmes, un peu comme des billes qui, lâchées de divers endroits du bord d'un bol, s'y retrouvent groupées au fond. Il y a là une sorte d'« attracteur » : les logiciens de l'époque ont bien vu le même objet, mais sous des perspectives différentes. Cette convergence, jointe à d'autres arguments techniques, montre qu'on a enfin mis la main sur une notion robuste et stable d'algorithme (une situation que le logicien austro-américain Kurt Gödel devait qualifier de *« miraculeuse »*).

D'autre part, en 1936, on a démontré l'existence de fonctions non calculables par algorithmes (ou, de façon équivalente, de problèmes insolubles par algorithmes). S'agissant des fonctions de **N** (l'ensemble des nombres entiers) dans **N** – car c'est toujours d'elles dont il s'agit lorsqu'on parle de calculabilité, du moins à cette époque –, l'argument qui établit l'existence de ces fonctions peut résulter d'un simple argument de cardinalité : les algorithmes (ce que nous appellerions aujourd'hui les « programmes ») sont des textes finis, dont on peut écrire la liste. Alors que les fonctions de **N** dans **N** forment un ensemble infini de cardinalité plus haute (il y en a autant que de nombres réels, or les nombres réels ne peuvent être énumérés comme le sont les entiers).

TEMPS D'EXÉCUTION

Mais un argument donné par Alan Turing lui-même prend un tour plus précis et « constructif ». Selon lui, il y a une question très particulière qui ne peut être résolue à l'aide d'un algorithme : celle de l'arrêt des « machines de Turing » (lire ci-dessous), qui consiste justement à se demander si un algorithme donné va fournir ou non un résultat pour un argument donné. C'est en démontrant cette impossibilité particulière que Turing établira que certains problèmes, parfaitement définis, n'admettent aucune solution algorithmique.

On pourrait à l'infini discuter la signification « philosophique » de ce résultat qui montre les limites des algorithmes autant que l'étendue de leur empire : des machines qui les incarnent naissent des problèmes qui en excèdent les capacités de décision. Mieux vaut, pour conclure, signaler que la période « classique » de la théorie des algorithmes, ouverte par Turing, n'est plus vraiment la nôtre, et ce pour une raison essentielle : la frontière de Turing, celle qui sépare le calculable de l'incalculable, n'est plus vraiment la nôtre non plus.

Compte tenu de l'« incarnation » des algorithmes dans des machines physiques et de la place désormais tenue par ces machines dans nos vies, ce qui nous intéresse n'est plus de savoir si un problème a une solution algorithmique, mais quelle est la complexité de l'algorithme en question ou sa rapidité d'exécution. Il existe en principe un algorithme permettant de gagner à coup sûr aux échecs si l'on joue avec les blancs, et il en existe un autre qui permet à un commercial d'optimiser la longueur de ses tournées. Mais ces algorithmes, dont le temps d'exécution est une fonction exponentielle de la taille des données auxquelles on les applique, ne font pas l'affaire pour les créatures pressées que nous sommes : de l'algorithme qui établit la position souhaitable des parties mobiles des ailes d'avion en fonction de sa vitesse, de sa position relative au sol, etc., nous voulons, non seulement qu'il s'arrête avec un résultat pour les valeurs données, mais qu'il délivre son verdict avant que les roues ne touchent le sol. En outre, loin des machines abstraites imaginées par Turing, le calcul a un coût : à quoi nous servirait, pour économiser l'argent que nous gaspillerions en choisissant un trajet routier suboptimal, de nous engager dans un calcul d'optimalité qui nous coûterait plus que l'économie réalisée ? ■

(1) *Histoire de l'Académie royale des sciences, Année 1775*, 1778, http://bit.ly/1ToliEg.

Les machines de Turing

Pour analyser ce que « calculer de façon algorithmique » veut dire, Alan Turing a introduit en 1936 la notion de « machine » qui porte désormais son nom, et qui est une représentation idéalisée d'un homme qui calcule. Un tel automate abstrait comporte, d'une part un ruban infini divisé en cellules pouvant contenir des 0 ou des 1, d'autre part une tête positionnée face au ruban et capable de se déplacer d'une cellule à l'autre dans les deux sens (cette tête est en outre capable d'être dans divers états internes, dont un état initial et un état final).

Un algorithme est, dans ce format, représenté par la suite finie des « instructions » de la machine, une instruction <q,S,X,q',S'> étant une consigne du type « si, dans l'état q, vous êtes en face d'une cellule contenant le symbole S (donc un 0 ou un 1), alors faites le mouvement X (déplacez-vous d'un pas vers la gauche, ou vers la droite, ou ne bougez pas), passez dans l'état q' et écrivez le symbole S' dans la cellule qui est en face de vous ». On dit que la machine calcule la fonction *f* si, chaque fois que, dans son état initial, elle contemple le premier élément d'une suite de *n* chiffres 1, elle achève son travail en étant dans son état final devant le dernier élément d'une suite de *f(n)* chiffres 1.

La Recherche Complétez votre collection

LE MENSUEL
6,40€ le numéro

Année 2014

- N°486 avril 2014
  Dossier : Le génie d'Alexandre Grothendieck.
- N°487 mai 2014
  Dossier : T-Rex. Enquête sur la star des dinosaures.
- N°488 juin 2014
  Dossier : Bitcoin, la monnaie devient numérique.
- N°489 juillet-août 2014
  SPECIAL : La réalité n'existe pas.
- N°490 août 2014
  Les 40 livres de science indispensables.
- N°491 septembre 2014
  Dossier : Qui sont vraiment nos ancêtres ?
- N°492 octobre 2014
  Dossier : Incertitude quantique.
- N°493 novembre 2014
  Dossier : Comment savons-nous que nous sommes morts ?
- N°494 décembre 2014
  Dossier : Maths, les femmes prennent-elles le pouvoir ?

Année 2015

- N°495 janvier 2015
  Dossier : Les 10 découvertes les plus importantes de l'année.
- N°496 février 2015
  Dossier : L'origine de l'univers dévoilée.
- N°497 mars 2015
  Dossier : Stress, comment il modifie notre cerveau.
- N°498 avril 2015
  Dossier : Intelligence artificielle, jusqu'où iront les réseaux sociaux.
- N°499 mai 2015
  Dossier : Kilo, Ampère, Kelvin, Mole Pourquoi les physiciens redéfinissent les unités de mesure.
- N°500 juin 2015
  Dossier : Neurosciences. Comment l'empathie naît chez l'Homme.
- N°501-502 juillet-août 2015
  NUMÉRO DOUBLE
  Dossier : Les révolutions quantiques.
- N°503 septembre 2015
  Dossier : Trois stratégies pour vaincre Parkinson.
- N°504 octobre 2015
  Dossier : Terres en vue.
- N°505 novembre 2015
  Dossier : Comment le cerveau innove.
- N°506 décembre 2015
  Dossier : L'univers recréé en laboratoire.

Année 2016

- N°507 janvier 2016
  Dossier : Les 10 découvertes de l'année.

LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE
6,90€ le numéro

Année 2013

SP02 : Les origines de la vie
SP03 : Les abysses
SP04 : Les particules élémentaires
SP05 : Jeux de mathématiques et de physique
SP06 : Addictions
SP07 : L'album de l'année 2013

Année 2014 NOUVELLE FORMULE

SP08 : L'intelligence artificielle
SP09 : Les nouvelles dimensions du son
SP10 : Piloter la machine par la pensée
SP11 : Internet, pour le meilleur et pour le pire
SP12 : La télévision du futur
SP13 : Comment les robots perçoivent le monde

Année 2015

SP14 : La lumière
SP15 : La conscience
SP16 : Einstein

Et pour conserver votre collection précieusement

➲ **l'écrin 12 numéros**
18€ seulement
(hors frais de port)

Retrouvez l'intégralité des numéros disponibles sur le site www.sophiaboutique.fr

Bon de commande

À retourner sous enveloppe affranchie à LA RECHERCHE
BP 65 - 24 chemin Latéral - 45390 Puiseaux - ✆ 33 (0) 2 38 33 42 89 - nchevallier.s@orange.fr

V511

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville : Pays :

Portable : E-mail : @

Pour recevoir plus rapidement des informations sur votre commande, merci de nous indiquer votre e-mail.

Oui, je souhaite recevoir dans les 10 jours la commande ci-dessous

Indiquez ci-dessous les numéros souhaités	Quantité	Prix unitaire	TOTAL
■ LA RECHERCHE		6,40 €	€
■ LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE		6,90€	€
■ L'écrin LA RECHERCHE 12 numéros		18,00 €	€
FRAIS DE PORT : France métropolitaine (Étranger, nous contacter) **1,50€** le numéro / **+ 0,50€** le numéro supplémentaire **6,85€** l'écrin / **8,35€** de 2 à 3 / **9,10€** de 4 à 5 Au-delà de 5 écrins, nous contacter.			€ €
Total de ma commande (Frais de port inclus)			€

Je règle aujourd'hui par :

❒ chèque à l'ordre de *SOPHIA PUBLICATIONS* ❒ carte bancaire

N°

Je note aussi les 3 derniers chiffres du numéro inscrit au dos de ma carte bancaire, au niveau de la signature : Expire fin :

Signature obligatoire :

Votre commande sera expédiée à réception de votre règlement.

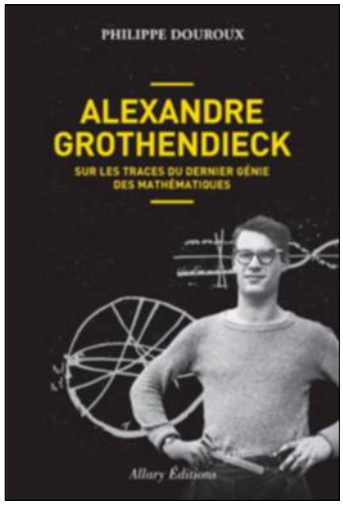
Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des données vous concernant. Elles pourront être cédées à des organismes extérieurs sauf si vous cochez la case ci-contre ☐

Le livre du mois

Alexandre Grothendieck

De Philippe Douroux

Peut-on parler d'un mathématicien sans expliquer ses mathématiques ? Cette biographie étonnante d'Alexandre Grothendieck en fait la démonstration. Son auteur, Philippe Douroux, est fasciné depuis longtemps par le *« dernier génie des mathématiques »*, et pourtant les grandes idées algébrico-géométriques de son héros lui sont inaccessibles. Il faut dire que l'œuvre de Grothendieck est vraiment difficile, même pour un spécialiste. Être fasciné par l'incompréhensible ? Cela peut paraître surprenant pour beaucoup de mathématiciens qui affirment que le plaisir des maths réside précisément dans la compréhension. Mais Douroux n'est pas mathématicien, et c'est tant mieux pour les lecteurs, puisque ce livre n'exige aucune connaissance en la matière. C'est en journaliste qu'il mène l'enquête.



Il a d'abord tenté de rencontrer Grothendieck dans le village où il vivait reclus pendant les dernières années de sa vie. *« De quel droit vous intéressez-vous à ma vie ? »* lui demande l'homme. Alors Douroux s'est résigné à rencontrer des témoins, anciens élèves ou collaborateurs, qui ont connu le mathématicien. Le portrait de l'homme qui en résulte est d'une grande richesse. Bien sûr, les mathématiques sont omniprésentes – comment pourrait-il en être autrement ? – mais elles sont comme en toile de fond et gardent tout leur mystère. Le lecteur est rassuré dès le début, où l'on évoque le concept de « motifs » inventé en 1964 : *« On peut entrer dans ce livre sans rien comprendre à cette notion »*. Ouf ! Car s'il avait fallu comprendre, j'aurais été le premier à le refermer.

Il faut dire que le personnage est passionnant, bien au-delà de ses découvertes scientifiques, et mérite largement une biographie. Né en 1928 à Berlin, d'un père ukrainien et d'une mère allemande, tous deux anarchistes, il est entraîné par l'Histoire. Ses parents quittent l'Allemagne pour l'Espagne en 1934. En 1939, le petit Alexandre est envoyé en France. Son père décédera à Auschwitz. Après la guerre, il « monte à Paris » et l'aventure mathématique commence. Une vingtaine d'années plus tard, il aura révolutionné la géométrie algébrique. Il reçoit la médaille Fields en 1966 mais refuse d'aller la chercher à Moscou. En 1970, sa vie bascule, il décide d'arrêter la recherche mathématique, s'investit à fond dans l'écologie politique et devient professeur à Montpellier. En 1990, il se retire dans un village en Ariège, où il vit en ermite jusqu'à son décès en novembre 2014.

Ce livre raconte tout cela en détail, comme dans une visite guidée de l'histoire du XX^{e} siècle. On y découvre l'ardeur et la passion de Grothendieck mais aussi son sale caractère, sa manie de se fâcher avec tout le monde, sur une question mathématique ou pour une mauvaise herbe qu'il n'aurait pas fallu arracher. On apprend que Grothendieck cherche à démontrer l'existence de Dieu et du diable, qu'il jeûne souvent, qu'il pratique la méditation. Pendant toutes ces années, il écrit beaucoup. Ses textes sont surprenants. Son livre *Récoltes et Semailles* n'est pas publié car trop long, trop disparate, polémique et parfois délirant. D'autres textes, plus « normaux », ont eu une influence considérable en mathématiques, par exemple *Esquisse d'un programme,* écrit en 1984 à l'occasion d'une candidature inattendue sur un poste de chercheur au CNRS.

En lisant cette biographie, je prends conscience qu'elle présente parfois une vision quelque peu romantique des mathématiques, avec ses génies incompris et incompréhensibles, comme Galois ou Grothendieck. Le monde mathématique que je connais au quotidien est bien différent, mais on n'écrit pas de livres sur les gens « normaux ». Il ne s'agit pas de la sociologie d'une communauté scientifique mais bien du portrait d'un être exceptionnel.

Philippe Douroux a relevé son défi. En tournant autour de son personnage, en n'essayant pas d'entrer dans ses mathématiques – ce qui aurait été illusoire –, il a réussi à suggérer au lecteur non mathématicien tout ce que les mathématiques peuvent receler de passionnel.

Étienne Ghys, directeur de recherche CNRS à l'École normale supérieure de Lyon, membre de l'Académie des sciences.

Allary Éditions, 250 p., 18,90 €.

ÉCONOMIE

Nos mythologies économiques

Pas de doute : la lecture de l'ouvrage d'Éloi Laurent ne vous laissera pas indifférent. Cet économiste à l'Observatoire français des conjonctures économiques, enseignant à l'université Stanford, démonte un par un les mythes économiques actuels. Une grande partie du livre est consacrée aux mystifications liées aux questions environnementales, qui entravent bon nombre d'initiatives. « L'écologie est l'ennemie de l'innovation » ? Faux. « La transition écologique est une affaire de riches » ? Encore faux, démonstration et chiffres à l'appui. À lire absolument.

Éloi Laurent, *Les Liens qui Libèrent, 112 p., 12 €.*

PSYCHOLOGIE

Histoire de la psychologie

La psychologie semble être une science récente. Il n'en est rien. Cette discipline prend racine dans l'Antiquité, chez Aristote et Platon ; elle se renouvelle au Moyen Âge avec saint Augustin ; elle devient une science moderne aux XIXe et XXe siècles. Olivier Houdé, professeur de psychologie à l'université Sorbonne-Paris-Cité, nous raconte cette histoire dans un récit érudit et passionnant. Une histoire qui est intimement liée à celle de la philosophie et de la biologie, et au sein de laquelle se côtoient mythes fondateurs et expériences étonnantes.

Olivier Houdé, *Puf, 126 p., 9 €.*

ÉCOLOGIE

De la pêche à l'aquaculture

Fabrice Teletchea, Maître de conférences à l'université de Lorraine, est né à Saint-Pierre-et-Miquelon et descend d'une famille de marins-pêcheurs. Sa voie aurait donc dû être toute tracée. *« Mais cette opportunité ne m'a pas été donnée*, explique-t-il en avant-propos, *car la mer a été vidée en quelques décennies de tous ses poissons. »* Comment en est-on arrivé là ? C'est ce que ce scientifique a cherché à comprendre. Il livre aujourd'hui le résultat de dix ans de réflexion sur le sujet dans un ouvrage très complet qui fait l'état des lieux de ce domaine sinistré, puis en présente les défis et les enjeux pour les années à venir.

Fabrice Teletchea, *Belin, 176 p., 19,90 €.*

GÉNÉTIQUE

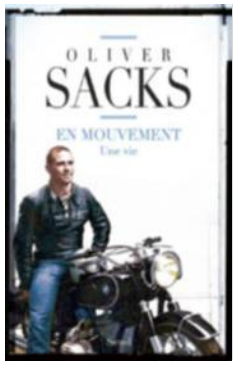
Programmé mais libre

L'ambition de ce livre personnel est de *« faire la part de ce qu'on peut raisonnablement espérer* [de la génétique, NDLR] *et de ce qui est illusoire ».* Page après page, l'auteur, fondateur du département de génétique de l'hôpital Necker, à Paris, s'emploie donc à dénoncer les fausses promesses de certains (les promoteurs de la médecine prédictive, par exemple), à présenter – de manière souvent didactique – ce qu'il considère comme les avancées réelles en matière de séquençage du génome et à soulever les questions qui interrogent son éthique.

Arnold Munnich, *Plon, 142 p., 14,90 €.*

Coup de cœur

En mouvement. Une vie

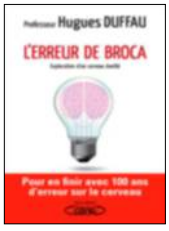


« Je suis probablement trop lunatique, trop indolent, trop maladroit et même trop malhonnête pour devenir un bon chercheur. Les seules choses que j'aime vraiment, c'est parler, lire et écrire. » **Ces passions, Oliver Sacks a su les mettre au service des malades et des neurosciences. À la lecture de son ultime autobiographie, on comprend à quel point il a aimé écouter ceux qui venaient le consulter.** ***« Il m'incombe professionnellement d'enquêter sur le moindre aspect de leurs vies. »*** **Le docteur Sacks a passé la plus grande partie de la sienne à étudier des patients souffrant de troubles neurologiques, comme l'autisme et le syndrome de Tourette. Avec talent, il sut éviter** ***« l'erreur de croire qu'en neurologie les dispositifs mécaniques ou électriques sont susceptibles de remplacer l'étude de la personnalité »,*** **comme lui écrivit le neurologue russe Alexandre Luria. Sa bouleversante expérience auprès de personnes souffrant d'encéphalite léthargique, une forme grave de maladie du sommeil, est à ce titre emblématique. Cette autobiographie révèle les ressorts intimes de ce médecin brillant, original et passionné. Que ce soit pour la moto, l'haltérophilie, la natation, la littérature, la musique et les sciences, Oliver Sacks s'est toujours engagé à fond.**

Oliver Sacks, *Seuil, 400 p., 25 €.*

NEUROLOGIE

L'Erreur de Broca



Au XIXe siècle, l'anatomiste Paul Broca découvre l'existence d'une zone cérébrale spécifique au langage : l'aire de Broca. Dans ce livre, le neurochirurgien Hugues Duffau ébranle cette idée séculaire. Après avoir opéré le cerveau de patients sans les endormir et en leur demandant de réaliser différentes tâches cognitives sur la table d'opération, il a montré que chaque individu mobilise des zones différentes de son cerveau pour le langage. Avec cette méthode, il a pu opérer des centaines de patients jugés a priori inopérables.

Hugues Duffau, *Michel Lafon, 281 p., 17,95 €.*

Beau livre

Poissons d'eau douce de Guyane

Pendant neuf ans, Frédéric Melki, docteur en pharmacie devenu ichtyologue (spécialiste des poissons), a plongé dans les fleuves de Guyane pour répertorier et photographier la riche faune qui les peuple. Au moins 427 espèces d'eau douce ou saumâtre vivent dans les quelque 110 000 kilomètres qui constituent le réseau hydrographique de ce département d'outre-mer. Le résultat de ce travail est compilé dans cet ouvrage richement illustré. On y découvre des clichés étonnants, tels que ceux de l'anguille tété, appartenant à un groupe apparu il y a 400 millions d'années, ou encore les images rares comme celle du *Gladinium leopardum,* dont la robe bigarrée rappelle celle du léopard. Vivant la nuit, très discret, ce poisson est en effet extrêmement difficile à observer. Puis, au détour d'une page, le lecteur se retrouve face aux dents acérées de l'aymara, un féroce prédateur devenu une «icône en Guyane». Sous la forme d'un carnet de voyage empruntant les méandres des cours d'eau guyanais, cet ouvrage ouvre une fenêtre sur un monde merveilleux et méconnu.

Frédéric Melki, *Biotope Éditions, 348 p., 49 €.*

BIOLOGIE

De la pénicilline à la génomique : portraits et rencontres

François Gros a contribué aux grandes avancées de la biologie moderne. Il a participé aux travaux qui ont permis de découvrir comment le message génétique était transcrit puis traduit en molécules dans une cellule. Il a été directeur de l'Institut Pasteur, professeur au Collège de France. Cet éminent biologiste retrace cinquante ans de recherches et de réflexions à travers des rencontres hors du commun. Des scientifiques bien sûr, comme James Watson, le codécouvreur de la structure de l'ADN, mais aussi des politiques, comme François Mitterrand.

François Gros, *Odile Jacob, 182 p., 22,90 €.*

PALÉONTOLOGIE

T. rex superstar

La chasse aux squelettes de dinosaures bat son plein en Amérique dans la seconde moitié du XIXe siècle et au début du XXe. Un homme, Barnum Brown, tira de cette «fièvre» une notoriété particulière par le nombre de fossiles découverts, parmi lesquels quelques tyrannosaures. Le paléontologue Jean Le Loeuff raconte ici non sans humour l'histoire de cette *«ruée vers l'os».* Il décrypte également l'exploitation du prédateur dans la littérature et le cinéma, marquée par de grands succès populaires comme *Jurassik Park* et *Le Monde perdu.* Instructif et distrayant.

Jean Le Loeuff, *Belin, 240 p., 19 €.*

NEUROSCIENCES

Proust et le calamar

Notre cerveau n'est pas programmé pour la lecture. Sa plasticité lui permet toutefois de se reconfigurer pour apprendre à lire. Pour l'auteure, neuroscientifique, la lecture n'est pas une fin en soi, mais le meilleur moyen de former notre esprit et notre cerveau. Prenant comme point de départ un extrait de *Sur la lecture* de Marcel Proust, elle oppose la lecture profonde sur papier, terreau de la réflexion et de la pensée, à la lecture superficielle sur écran, polluée par de nombreuses distractions. Et fait part de son inquiétude sur la façon dont le numérique s'apprête à modifier notre cerveau-lecteur.

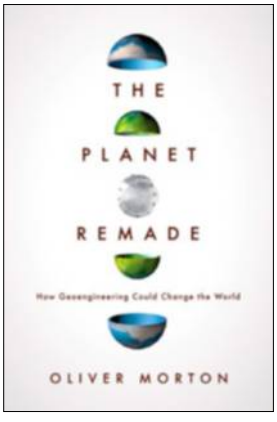
Maryanne Wolf, *Abeille et Castor, 412 p., 22 €.*

Lu d'ailleurs

The Planet Remade

d'Oliver Morton

Le constat est sans appel. Les risques associés au réchauffement climatique – montée du niveau des océans, baisse de la production agricole, inondations accrues… – sont bien réels. Et la difficulté de se passer des énergies fossiles dans notre économie actuelle est redoutable. Face à cette crise climatique, il est urgent de prendre des mesures drastiques, lance Oliver Morton, journaliste au magazine britannique *The Economist,* dans son livre *The Planet Remade.* Pour lui, les efforts des politiques pour réduire les émissions de CO_2 n'y suffiront pas: il faudra forcément faire appel à la géo-ingénierie du climat, dont l'objectif est de modifier volontairement le climat en notre faveur. Dans ce plaidoyer pour cette technologie en plein essor, Oliver Morton s'attache à montrer que ses partisans ne sont pas des savants fous. Leur objectif, dit-il, n'est pas de «trafiquer» le climat mais d'offrir une solution de dépannage pour maintenir les températures au niveau actuel, le temps que notre société puisse se défaire des énergies fossiles – si tant est qu'elle y parvienne un jour.



L'auteur détaille les différentes techniques envisagées, depuis la diffusion d'aérosols soufrés dans la stratosphère pour réfléchir la lumière du soleil, jusqu'au dopage du plancton marin avec du fer pour piéger le CO_2. Il n'élude pas la question des risques associés à ces nouveaux outils – comme la menace que représentent les particules de soufre sur la couche d'ozone. Il montre aussi qu'avec la géo-ingénierie, on aurait affaire à une autre forme de changement climatique. Un voile d'aérosols rendrait ainsi la Terre plus sèche: il y aurait donc des gagnants et des perdants sur cette planète remaniée par l'homme. Mais dans la plupart des scénarios présentés dans le livre, même les perdants s'en sortiraient mieux que si la planète se réchauffait de 2 °C, ou plus, sous l'effet des gaz à effet de serre, comme on le prévoit d'ici à 2100.

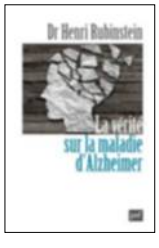
Cet argument permettra-t-il à la géo-ingénierie du climat de s'imposer? Pour Oliver Morton en tout cas, cette science a le potentiel de changer, pour le meilleur, la relation entre l'homme et la nature. Aujourd'hui, il semble que la plupart d'entre nous attendent que les activités humaines aient fait plus de dégâts encore pour se remettre en cause. ***«Je m'oppose à cette idée,*** **écrit-il.** ***Je refuse d'accepter un monde dans lequel rien ne peut être protégé et où seuls les sentiments de peine et de perte permettent de tirer des leçons. »***

Julien Bourdet, journaliste à Londres

Granta, *2015, 448 p., 20 £.*

SANTÉ

La Vérité sur la maladie d'Alzheimer



La cause de la maladie d'Alzheimer demeure inconnue. En outre, seule une autopsie du cerveau permet de poser un diagnostic fiable. Dans cet essai, l'auteur rappelle ainsi qu'un patient atteint de troubles de la mémoire et de démence n'est pas fatalement atteint de cette maladie. Quelle serait donc la cause de ces démences? La peur de la mort, répond Henri Rubinstein. Il gage que la plupart des patients présentant des symptômes alzheimériens préfèrent sombrer dans la démence plutôt que de se voir vieillir et mourir.

Henri Rubinstein, *Puf, 166 p., 17 €.*

CULTURE SCIENTIFIQUE

Pourquoi elle monte, ma mayonnaise?

Anthony Duncan, enseignant-chercheur à l'université de Rouen, propose avec cet ouvrage 80 questions-réponses scientifiques amusantes, et nombre d'expériences pour interagir de façon originale avec des produits de consommation courante, ou presque. Des expériences à réaliser chez soi, dans sa cuisine ou au bureau. Comment disposer de champagne frais instantanément sans réfrigérateur? Comment faire léviter un aimant? Comment faire pour qu'un savon ne mousse plus? De quoi épater ses amis.

Anthony Duncan, *Leduc.S Éditions, 14 €.*

Forum Science, recherche et société

Les vaccins sont-ils dangereux ? Les molécules innovantes dans la lutte contre le cancer sont-elles trop chères ? L'endoctrinement concerne-t-il tout le monde ? Pour sa 8e édition, le Forum Science, recherche et société, organisé par *La Recherche* et *Le Monde*, est l'occasion de débattre des grands défis qui se posent à la science et à la société. Vous y retrouverez deux conférences plénières et dix tables rondes dans lesquelles s'exprimeront des scientifiques de haut rang et des personnalités de la société civile. Parmi eux, Thierry Mandon, secrétaire d'État chargé de l'Enseignement supérieur et de la Recherche ; François Margolin, coréalisateur du film *Salafistes ;* Frédéric Tangy, virologue à l'Institut Pasteur ; Odile Launay, infectiologue à l'hôpital Cochin ; Élisabeth Dechenaux, expert énergie et environnement chez Orange Labs ; Dounia Bouzar, anthropologue, et Daniel Kaplan, membre du Conseil national du numérique.

Le 25 mai de 9 h à 20 h, Paris, Conservatoire national des arts et métiers.

www.forum-srs.com

EXPOSITIONS

Jusqu'au 5 juin
Ma planète vue de l'espace

Les glaciers fondent, le niveau des mers monte, les forêts tropicales sont menacées, les terres cultivables se désertifient et l'urbanisation s'étend de façon incontrôlée. À travers des images satellite, cette exposition illustre ces phénomènes et montre à quel point notre planète change.

Paris, palais de la Découverte.

tinyurl.com/palais-decouverte-planete

Jusqu'au 19 juin
Mémoire/s

La mémoire joue un rôle dans chacun de nos gestes, et pourtant, elle reste un mystère. À travers des expériences, vidéos, reportages, jeux, découvrez le fonctionnement du cerveau et ses anomalies, les différents types de mémoire, celle des animaux, ou encore la mémoire informatique.

Cran-Gevrier (Haute-Savoie), La Turbine.

http://laturbinesciences.agglo-annecy.fr

CONFÉRENCES

Le 3 mai, 19 h 30
Les sites de formation des étoiles

De 2009 à 2013, le satellite Herschel a observé le ciel dans le spectre infrarouge. L'astrophysicienne Delphine Russeil raconte comment cette mission a révolutionné notre connaissance sur la formation des étoiles, mettant en évidence la structuration du milieu interstellaire en filaments, et permettant l'étude de l'évolution stellaire précoce.

Paris, Institut d'astrophysique.

tinyurl.com/iap-fr-conf2016

Du 3 au 24 mai
La modernité en crise

Dérèglement climatique, pollutions, perte de biodiversité… Les sociétés modernes se mettent en danger. Chaque mardi à 19 heures, un chercheur parle des solutions qui s'offrent à nous, comme les énergies alternatives, le nettoyage des océans, ou les « basses technologies ».

Paris, Cité des sciences et de l'industrie.

tinyurl.com/cite-sciences-fr-modernite

Le 4 mai, 20 h 30
Les mondes perdus d'Amazonie

Le bassin amazonien abrite une biodiversité unique à l'échelle du globe, aujourd'hui en danger. Pour les paléontologues comme Pierre-Olivier Antoine, les fossiles aident à remonter aux sources de cette biodiversité, à mieux comprendre son évolution, et à réfléchir avec recul à son érosion actuelle.

Montpellier (Hérault), centre Rabelais.

tinyurl.com/agora-des-savoirs-amazonie

Le 8 mai, 15 h
Dans la peau des reptiles

Les serpents sont froids, visqueux et dangereux. L'herpétologue Françoise Serre-Collet s'attaque aux idées reçues sur ces reptiles. Photos à l'appui, elle explique comment ils régulent leur température, pourquoi ils muent, ce qu'ils mangent…

Taglio-Isolaccio (Haute-Corse), parc Galea.

www.parcgalea.com

Le 10 mai, 17 h 30
Traiter l'addiction

La lutte contre les addictions passe à la fois par le traitement médical et les politiques publiques de prévention. Le médecin Charles Vanbelle et le juriste Christophe Broche montrent comment ces deux approches peuvent fournir une réponse cohérente et globale.

Chambéry (Savoie), Présidence de l'université Savoie-Mont-Blanc. Et le 12 mai à 17 h 30 à Cran-Gevrier (Haute-Savoie).

tinyurl.com/univ-smb-fr-addiction

Le 10 mai, 20 h 30
Des intelligentes bêtes

En Mongolie, l'élevage est une coopération entre

l'homme et l'animal. Les éleveurs laissent une grande autonomie à leurs bêtes, qui prennent parfois elles-mêmes des décisions. L'anthropologue Charlotte Marchina a étudié ce système complexe, qui révèle les capacités cognitives des animaux.
Chartres (Eure-et-Loir), pôle universitaire d'Eure-et-Loir.
tinyurl.com/centre-sciences-org-mardis

Le 10 mai, 20 h 30
La métallurgie : des bronzes antiques à l'aéronautique

Les métaux et alliages ont toujours joué un rôle majeur dans les activités humaines. Mais la nature des liens entre les métaux à l'échelle atomique n'a été établie que récemment. Jacques Poirier, physicien des matériaux, explique comment l'élaboration de nouveaux alliages s'appuie sur ces connaissances.
Orléans (Loiret), hôtel Dupanloup.
tinyurl.com/centre-sciences-org-mardis

Le 17 mai, 10 h
Santé, éthique et génétique

Deux tables rondes réunissent des experts du secteur médical pour répondre aux questions du public. La première (à 10 heures) évoque les handicaps « invisibles », et les difficultés de prise en charge qu'ils impliquent. La seconde (à 14 heures) interroge sur le rôle que peuvent jouer les patients dans la pratique médicale.
Marseille (Bouches-du-Rhône), hôpital Adultes de la Timone.
tinyurl.com/medetique-tables-rondes

Le 25 mai, 18 h
Un peu de lumière sur la matière noire

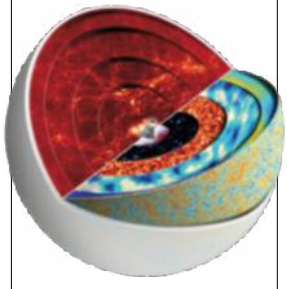
Lorsque l'on recense la masse totale de la matière connue dans l'Univers pour la confronter aux théories actuelles, on constate qu'une partie importante est manquante. C'est ce que l'on appelle la « matière noire ». D'où vient-elle ? Où se cache-t-elle ? L'astrophysicienne Françoise Combes aborde ces questions.
Châtellerault (Vienne), salle du Verger.
tinyurl.com/emf-fr-matiere-noire

Le 26 mai, 18 h
Le minerai de fer cénomanien

Des travaux au nord du Mans ont permis d'étudier des sites sidérurgiques anciens, dont des mines de fer. Jean-Yves Langlois, ingénieur à l'Institut de recherches archéologiques préventives, présente la genèse de la formation de ce minerai, puis son exploitation et sa transformation dès l'âge du fer.
Le Mans (Sarthe), musée Vert.
tinyurl.com/lemans-fr-mineraidefer

Le 31 mai, 20 h
Mission Planck : l'histoire de l'Univers dévoilée

En observant le rayonnement fossile, la plus ancienne lumière de l'Univers, le satellite Planck a confirmé avec une précision inégalée des prédictions théoriques avancées au cours des années 1980. François Bouchet, astrophysicien, présente quelques résultats issus des mesures du satellite qui ont fait progresser notre compréhension de l'Univers.



Toulouse (Haute-Garonne), salle du Sénéchal.
tinyurl.com/obs-mip-fr-bouchet

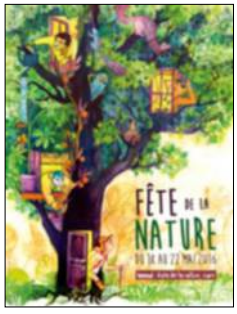
FESTIVALS

Le 11 mai, 20 h 30
Sciences en cour[t]s

À l'occasion de ce festival, des doctorants se transforment en réalisateurs pour des exercices de vulgarisation scientifique. Ils réalisent les films (de cinq minutes) qu'ils ont écrits et dans lesquels ils se mettent en scène pour présenter au grand public leurs travaux de thèse, dans toutes les disciplines.
Rennes (Ille-et-Vilaine), Le Diapason.
www.sciences-en-courts.fr

Du 18 au 22 mai
Fête de la nature

À travers toute la France, visitez de nombreux sites naturels à la rencontre de la faune et de la flore qui les peuplent. Observez les oiseaux, les insectes ou les invertébrés aquatiques, les arbres ou les orchidées, et découvrez les interactions qui lient tous ces éléments de la biodiversité.
Dans toute la France.
www.fetedelanature.com



Du 26 au 29 mai
Salon Culture et jeux mathématiques

Mathématiques et société sont indéniablement liés. C'est ce que démontre cette nouvelle édition du Salon Culture et jeux mathématiques, en exposant le rôle socio-économique des mathématiques, leur place dans le monde des décideurs et leurs débouchés.
Paris, place Saint-Sulpice.
www.cijm.org/salon

Pint of Science

Lancé en 2013 au Royaume-Uni, le festival Pint of Science organise cette année sa troisième édition française. L'idée ? Des chercheurs viennent expliquer leurs travaux au public… dans un bar. En trois jours, pas moins de 150 soirées sont organisées. À Paris, la physicienne Chiara Caprini s'intéresse à la découverte des ondes gravitationnelles. Erwan Bezard, chercheur en neurosciences, intervient à Bordeaux au sujet de la maladie de Parkinson. De nombreuses autres thématiques sont au programme comme l'évolution, la zoologie, les neurosciences, la psychiatrie, la chimie, la physique, les sciences de la Terre, les technologies, mais aussi les sciences humaines.
Du 23 au 25 mai, dans 19 villes de France. *http://pintofscience.fr*

Pourquoi a-t-on faim ?

Plusieurs fois par jour, notre estomac crie famine… Littéralement ! Il sécrète une hormone, la ghréline, qui déclenche la sensation de faim. Cette molécule est produite de façon cyclique, avec un pic juste avant le repas et une diminution progressive dès les premières bouchées. Tous les autres signaux chimiques et nerveux envoyés vers le cerveau par notre système digestif agissent au contraire comme des coupe-faim. Ces signaux sont traités par deux aires cérébrales, l'hypothalamus et le noyau du tractus solitaire, localisées sous le cortex.

Dès le premier coup de fourchette, ces deux organes reçoivent des signaux de préparation à la digestion. Puis lorsque notre estomac est plein, le cerveau est alerté qu'il est temps d'arrêter de manger. Cette information est émise par les neurones de la paroi de l'estomac. Il faut dire que ces derniers sont munis de récepteurs mécaniques capables de détecter les déformations typiques d'une panse bien remplie.

Les produits de la digestion pénètrent ensuite dans l'intestin. La quantité de lipides et de glucides qu'ils contiennent est alors évaluée par les cellules intestinales grâce à des récepteurs spécifiques. Selon cette quantité, les cellules intestinales déclenchent un signal nerveux ou libèrent des hormones qui accentueront le rassasiement. Une fois le repas terminé et digéré, l'intestin produit une faible quantité de sucre, déclenchant à son tour un message nerveux qui modère la faim au repas suivant.

Parmi les nombreuses hormones de régulation de la faim, la leptine joue un rôle majeur. Sécrétée par le tissu adipeux (l'ensemble des cellules graisseuses), elle informe en permanence le cerveau sur l'état des stocks d'énergie. Plus la masse graisseuse d'un individu est importante, plus il sécrétera de leptine, et moins il aura faim. Au contraire, lorsqu'un individu perd beaucoup de poids, la diminution de sa masse graisseuse entraîne une importante baisse de la production de leptine. Le cerveau active alors la sensation de faim afin de ramener cette personne à son poids « normal », qui précédait sa perte de masse.

Ce mécanisme est en grande partie responsable de l'effet yo-yo de certains régimes amaigrissants.

Tous ces mécanismes physiologiques sont inscrits dans notre ADN et sont davantage adaptés au mode de vie de nos ancêtres chasseurs-cueilleurs qu'à nos habitudes occidentales contemporaines. De fait, avec la quantité de nourriture que nous ingérons – bien plus importante que celle de nos ancêtres –, nous ne devrions pas avoir autant faim. Dès lors, comment expliquer cette sensation qui nous tenaille trois fois par jour ? En réalité, parmi la multitude de signaux qui transitent par l'hypothalamus, nombre d'entre eux sont liés au plaisir de manger, à la texture des aliments. Toutes ces informations émotionnelles, sous-tendues par des facteurs psychologiques et environnementaux, activent la faim et entrent en compétition avec les signaux issus de notre métabolisme ancestral. Si l'on suit la logique de notre patrimoine génétique, manger devrait réduire notre appétit. Et pourtant, *« l'appétit vient en mangeant »*, comme le soulignait Rabelais.

Gautier Cariou

Remerciements à Amandine Gautier-Stein, biologiste à l'université Claude-Bernard de Lyon.

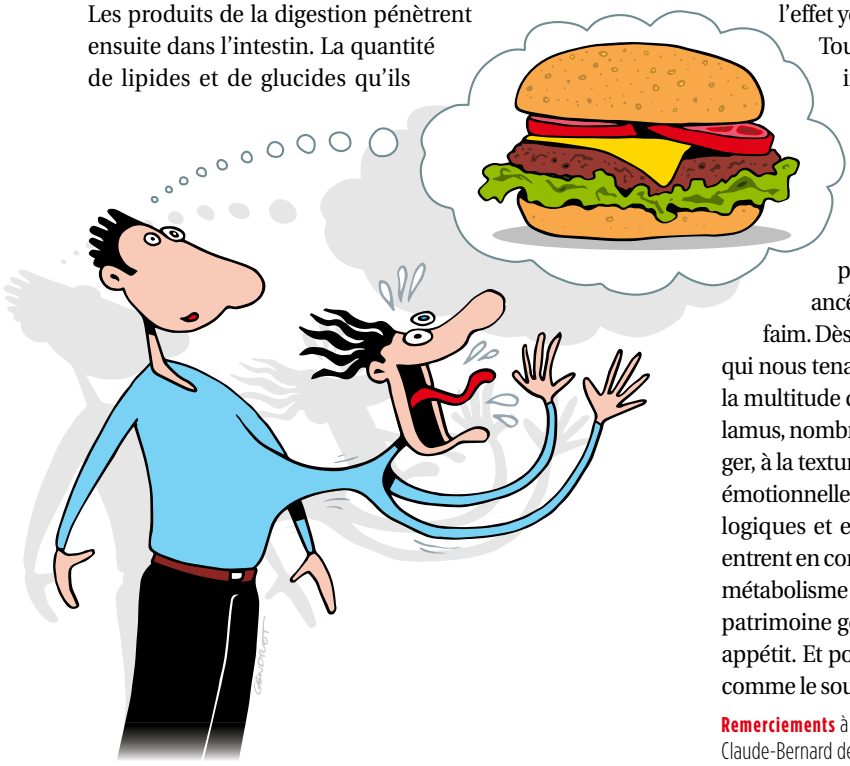


ILLUSTRATION : PAUL GENDROT

arte EDITIONS

LES POUVOIRS DU CERVEAU

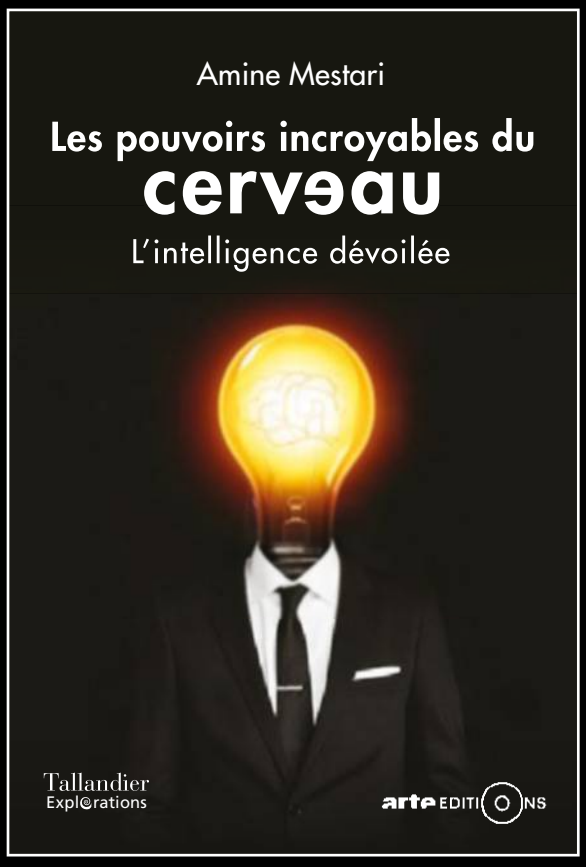
Un livre et un DVD à paraître le 3 mai

D'où viennent nos pensées ?

D'où vient l'intelligence émotionnelle ?

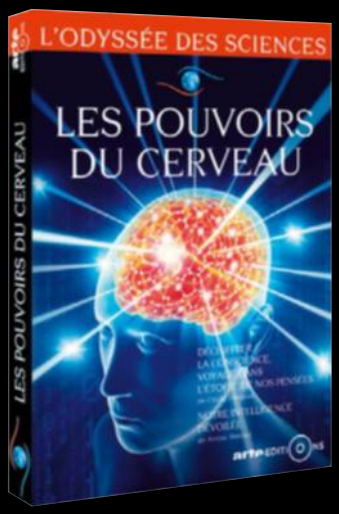
Quels sont les liens entre matière et esprit ?

Qu'est-ce que l'intelligence ?



Qu'est-ce que la conscience ?

Peut-on améliorer sa propre intelligence ?



Amine Mestari dissèque les diverses formes d'intelligence à travers une longue enquête menée auprès de nombreux scientifiques, psychologues, biologistes, généticiens, philosophes.

Deux films dans le DVD
« DÉCHIFFRER LA CONSCIENCE, VOYAGE DANS L'ÉTOFFE DE NOS PENSÉES »
et **« NOTRE INTELLIGENCE DÉVOILÉE »**

Livre et DVD disponibles en précommande dès maintenant sur **www.arteboutique.com**

OPEN INNOVATION

by

COSMETIC VALLEY

FRANCE

START UP, SME, PROJECT LEADER

MAJOR COSMETIC & PERFUMERY COMPANIES

Submit your projects & Get high qualified meetings at

COSMETIC360®

INNOVATIONS & SOLUTIONS > PARIS

© www.plainevue.fr - 2016

Register online before June 30th, 2016

www.cosmetic-360.com

+33 (0)2 37 211 211 - contact@cosmetic-360.com